

طراحی کنترلر PID مقاوم مبتنی بر نرم بی‌نهایت و با در نظر گرفتن پدیده وینداپ برای کنترل فعال ارتعاشات سازه‌ای

جواد پالیزوان زند^۱، جمشید صبوری^۲، جواد کاتبی^{۳*} و مهدی نوری^۴

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

۴. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

*jkatebi@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۰۹

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۹/۲۵

چکیده

پیاده‌سازی موفقیت‌آمیز تکنولوژی کنترل فعال، سزاوار وجود یک الگوریتم کنترلی مناسب برای محاسبه نیروی کنترل تطبیقی مورد تقاضای محرک‌ها است. مدل ریاضی سیستم تنها می‌تواند بیان تخمینی از رفتار دینامیکی واقعی آن باشد. بطور کلی این اختلاف می‌تواند تاثیر زیادی در کارایی و پایداری سیستم کنترلی داشته باشد. یکی از مسائل مهم در الگوریتم‌های کنترل فعال ارزیابی مقاوم بودن سیستم کنترلی در برابر نامعینی‌های مدل و مشکلات ناشی از اشباع محرک‌ها است. در این پژوهش یک کنترل‌کننده مقاوم تناسبی، مشتقی و انتگرالی (PID) مبتنی بر H_{∞} برای کنترل لرزه‌ای یک سازه مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده ارائه شده است. نیروی کنترل‌کننده PID، بنحوی بدست آورده می‌شود که نرم بی‌نهایت تابع تبدیل سیستم حلقه بسته از ورودی اغتشاش به خروجی‌های هدف کمینه شود. برای نمایش کارایی و پایداری مقاوم الگوریتم پیشنهادی، از نتایج شبیه سازی‌های عددی روی یک سازه ۴ طبقه مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده فعال استفاده می‌شود. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده کارایی و پایداری مقاوم کنترل‌کننده پیشنهادی در حضور عدم قطعیت‌های سختی سازه، پدیده ازدیاد نامتعارف انتگرال‌گیر ناشی از اشباع محرک و نویز اندازه‌گیری است.

واژگان کلیدی: کنترل مقاوم، پدیده ازدیاد نامتعارف انتگرال‌گیر، نرم بی‌نهایت، کنترل مقاوم H_{∞} ، اشباع عملگر.

۱. مقدمه

دینامیکی خارجی هستند. پارامترهای دینامیکی سختی و میرایی آن، با فرکانس غالب سازه تنظیم می‌شود. به دلیل وجود نامعینی در پارامترهای جرم و سختی سازه، تعیین دقیق

میراگرهای جرمی تنظیم شونده (TMDs)، یکی از ابزارهای کنترل غیر فعال ارتعاشات سازه‌ها در مقابل تحریکات

فرکانس غالب سازه در عمل غیر ممکن است، بنابراین میراگرهای جرمی تنظیم شونده در محدوده باریکی از فرکانس تحریک دینامیکی قابلیت عملکردی مطلوبی دارند [1-3]. برای بهبود عملکرد کنترلی سیستم‌های کنترل غیر فعال، از سیستم‌های کنترل فعال استفاده می‌شود [4]. از طرفی دیگر قوام^۱ یکی از ضروری‌ترین موضوعات طراحی در یک سیستم کنترلی است. زیرا سیستم‌های کنترلی در عمل علاوه بر آنکه در معرض اغتشاش‌های خارجی و نویز اندازه‌گیری هستند، بر اساس مدل‌های ریاضی طراحی می‌شوند که با سیستم واقعی اختلاف دارند. سیستم‌های کنترل مقاوم ضمن پایدارسازی سیستم، باید سطحی از کارایی را در حضور اغتشاش سیگنال‌ها، تداخلات نویزها، دینامیک‌های مدل نشده و نامعینی در پارامترهای سیستم فراهم آورند. در مسائل کنترل مقاوم، نامعینی‌ها به دو دسته کلی ساختاریافته^۲ و بدون ساختار^۳ طبقه‌بندی می‌شود. دسته اول با روش‌های نرم محدود^۴، ساختار محدود^۵، پارامتر محدود از یک ترکیب خطی^۶ و مقدار محدود^۷ و دسته دیگر به صورت جمع پذیر و ضربی مدلسازی می‌شوند. از رویکردهای مختلف طراحی کنترل کننده مقاوم، می‌توان به روش‌های مبتنی بر نرم بی‌نهایت^۸، نرم دوه، ترکیب آن‌ها، سنتز میو^{۱۰} و نامساوی‌های ماتریسی خطی^{۱۱} اشاره نمود. در کنترل مقاوم H_∞ ، معمولاً با استفاده از روش ریکاتی یا نامساوی‌های ماتریسی خطی، کنترل کننده به شکلی بدست آورده می‌شود که نرم بینهایت تابع تبدیل حلقه بسته در

حضور نامعینی‌ها، از ورودی اغتشاش به خروجی هدف، مینیمم شود [5].

الگوریتم‌های رایج کنترل لرزه‌ای سازه‌ها عموماً به مدل نامی سیستم وابسته هستند و ممکن است در حضور عدم قطعیت در پارامترهای سازه، کارایی مطلوبی نداشته و حتی باعث ناپایداری سازه شوند. از طرفی ساختار ساده و انعطاف پذیری بالای کنترل کننده PID، لزوم بکارگیری این کنترل کننده را در صنعت آشکار می‌سازد. بر این اساس وجود یک الگوریتم سیستماتیک برای تنظیم پارامترهای تناسبی، انتگرال گیر و مشتق گیر آن که به مسائلی از قبیل نامعینی‌های مدل و ماهیت تصادفی تحریک دینامیکی خارجی مقاوم باشد، ضروری است. ژانگ^{۱۲} و همکاران در سال ۲۰۱۱، برای کاهش آثار نویز و اغتشاش‌های خارجی برای سیستم‌های کنترل شبکه‌ای چند متغیره از کنترل کننده PID مقاوم مبتنی بر الگوریتم H_∞ استفاده کردند [6]. با وجود کاربرد وسیع کنترل کننده PID در صنعت، در تاریخچه کاربرد این کنترل کننده در حوزه کنترل ارتعاشات لرزه‌ای ساختمان‌ها پژوهش‌های کمی صورت گرفته است. گوجلو^{۱۳} برای اولین بار در سال ۲۰۰۶، برای کنترل لرزه‌ای یک سازه ۴ طبقه مجهز به یک عملگر در طبقه دوم، یک کنترل کننده تناسبی، انتگرالی و مشتقی و مود لغزشی طراحی کرد و برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده تناسبی، انتگرالی و مشتقی از روابط تجربی زیگلر-نیکولز بهره گرفت [7]. آگوئیر^{۱۴} و همکاران در سال ۲۰۱۱، برای کنترل نیمه فعال سازه ۳ طبقه مجهز به

1. Robustness
2. Structured
3. Unstructured
4. Norm bounded uncertainty
5. Structure bounded uncertainty
6. Parameter bounded uncertainty of linear combination
7. Value bounded uncertainty
8. H_∞
9. H_2
10. μ -Synthesis
11. Linear matrix inequalities
12. Zhang
13. Guclu
14. Aguirre

میراگر تنظیم پذیر مغناطیسی^۱، کنترل کننده تناسبی، انتگرالی ارائه دادند. آن‌ها بهره تناسبی و انتگرالی کنترل کننده را به شکلی تعیین کردند که ضمن پایداری سیستم، پاسخ سیستم حلقه بسته کمینه شود [8]. اعتدالی و همکاران در سال ۲۰۱۳، یک کنترل کننده تناسبی، انتگرالی و مشتقی مبتنی بر قواعد اسکوگستاد^۲ برای کنترل نیمه فعال یک سازه مجهز به سیستم جداساز پایه که در قسمت جداسازی شده از میراگر اصطکاکی پیزوالکتریک استفاده شده، ارائه داده و عملکرد کنترل کننده پیشنهادی‌شان را در کاهش همزمان تغییر مکان پایه و شتاب طبقات سازه تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک نشان دادند [9]. زمانی و همکاران (۲۰۱۷) با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامتر سختی سازه، برای تنظیم بهینه پارامترهای کنترل کننده مرتبه کسری تناسبی، انتگرالی و مشتقی از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته استفاده کردند و کارایی کنترل کننده پیشنهادی‌شان را روی سازه ۵ طبقه با سیستم جداساز پایه مجهز به میراگرهای اصطکاکی پیزوالکتریک در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه نشان دادند [10]. حیدری و همکاران در ۲۰۱۸ یک الگوریتم کنترل ترکیبی تنظیم پذیر مرتبه دو و تناسبی، انتگرالی و مشتقی را برای کنترل لرزه‌ای سازه ۱۰ طبقه مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده فعال پیشنهاد دادند [11]. محمودآبادی^۳ و نژادکورکی؛ در سال ۲۰۲۰، برای سیستم تعلیق فعال مدل یک چهارم خودرو، یک الگوریتم کنترل PID مقاوم تطبیقی فازی بهینه، پیشنهاد دادند [12].

وقوع پدیده وینداپ زمانی که محرک اشباع شود، اجتناب ناپذیر است و موجب می‌شود ورودی کنترلی متفاوت از سیگنالی باشد که در واقعیت به سیستم تحت کنترل اعمال می‌شود. این پدیده می‌تواند منجر به آثار

نامطلوب در پایداری و کارایی سیستم کنترلی شود [13]. کنترل‌کننده آنتی وینداپ اولین بار در کنترل سازه‌های ساختمانی توسط میثمی^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۳ ارائه شد. ایشان برای کنترل ارتعاشات مدل سازه‌ای ۲ طبقه مجهز به میراگر تنظیم پذیر مغناطیسی از کنترل کننده متغیر پارامتر خطی آنتی وینداپ استفاده کرده و عملکرد لرزه‌ای مطلوب این کنترل‌کننده را نشان دادند [14]. لی‌بو^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۷ با در نظر گرفتن نامعینی در پارامترهای سختی و میرایی و اشباع عملگر یک کنترل کننده فازی مبتنی بر جبر هدرج^۶ برای یک قاب برشی سه طبقه مجهز به سیستم مهاربندی فعال در طبقه اول پیشنهاد دادند و عملکرد کنترل کننده پیشنهادی‌شان را در کاهش دریافت و ماکزیمم شتاب طبقات نشان دادند [15]. علاوه بر اشباع محرک، نامعینی در مدل آن نیز می‌تواند بر عملکرد سیستم کنترلی تاثیرگذار باشد. سالوم^۷ و همکاران (۲۰۱۵) به مدلسازی تحلیلی و نامعینی در مدل محرک الکترومکانیکی پرداخته و اعتبار مدل کنترل موقعیت محرک را نشان دادند [16].

مدل ریاضی سیستم تنها می‌تواند بیان تخمینی از رفتار دینامیکی واقعی آن باشد. این اختلاف مدل از واقعیت باید در طراحی کنترل‌کننده که روی سیستم‌های واقعی پیاده‌سازی می‌شوند، در نظر گرفته شود. نامعینی در مدل محرک و پدیده وینداپ ناشی از اشباع آن نیز می‌تواند تاثیر زیادی در کارایی و پایداری سیستم کنترلی داشته باشد و باید این مورد هم در طراحی کنترل‌کننده مورد توجه قرار بگیرد. به دلیل ساختار ساده و انعطاف پذیری بالای کنترل‌کننده PID، لزوم استفاده از آن در کنترل ارتعاشات سیستم‌های سازه‌ای احساس می‌شود. در پژوهش‌های پیشین، طراحی کنترل‌کننده PID با استفاده از روش آنالیز مودال و تعداد محدودی از موده‌های ارتعاشی سازه

1. Magnetorheological damper (MRD)
2. Skogestad
3. Mahmoodabadi
4. Nejadkourki
5. Meisami
6. Hai-Le Bui
7. Hedge-algebras
8. Salloum

کنترلی فعال، که بسته به تعداد محرک از مرتبه $(m \times 1)$ است. ماتریس γ ماتریس موقعیت نیروی کنترلی فعال، که از مرتبه $(n \times m)$ است. لازم به ذکر است که m تعداد محرک است. اگر تعداد محرک برابر مقدار ۱ باشد، ماتریس D به بردار و بردار f به اسکالر تبدیل می‌شود.

۳- مدلسازی عدم قطعیت ساختاریافته برای سیستم سازه‌ای مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده فعال

مدل ریاضی سیستم تنها می‌تواند بیان تخمینی از رفتار دینامیکی واقعی آن باشد. بطور کلی این اختلاف از دینامیک‌های مدل نشده و نامعینی در پارامترهای سیستم ناشی می‌شود که می‌تواند تاثیر زیادی در کارایی و پایداری سیستم کنترلی داشته باشد در این مقاله برای تضمین کارایی و پایداری مقاوم سیستم کنترلی، عدم قطعیت ساختار یافته در پارامترهای فیزیکی سیستم سازه‌ای و نامعینی غیرساختاریافته در مدل محرک، در نظر گرفته می‌شود.

تبدیل کسری خطی ۲ یکی از روش‌های رایج برای مدلسازی نامعینی‌های ساختاریافته در مسائل کنترل مقاوم است [17]. در شکل (۱)، ساختار استاندارد LFT نشان داده شده است.

شکل ۱. ساختار استاندارد تبدیل کسری خطی

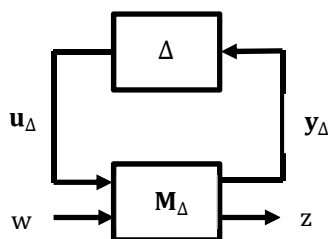


Fig. 1. Standard configuration of linear fractional transformation.

در شکل (۱)، Δ بلوک نامعینی، M_Δ ماتریس تابع انتقال تعمیم یافته، u_Δ سیگنال ورودی و y_Δ سیگنال خروجی از سیستم نامی گسترش یافته به سمت بلوک نامعینی، w

است. تنظیم بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی برای هر مود سیستم سازه‌ای، می‌تواند پیچیده و زمانبر باشد. در این مقاله، معادلات فضای حالت سیستم سازه‌ای ۴ طبقه مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده فعال با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل عملکرد به صورت نامعینی غیرساختاریافته ضربی و پارامتر فیزیکی سختی طبقات آن به صورت نامعینی ساختاریافته یا پارامتریک در حضور نیروی زلزله توسعه داده شده است. با توسعه معادلات فضای حالت، بهره‌های کنترل کننده PID بر اساس تئوری کنترل H_∞ با در نظر گرفتن پدیده ازدیاد نامتعرف انتگرال گیر در مدل کنترل کننده آن، به شکلی تعیین می‌شوند تا آثار تمام مودهای ارتعاشی بطور همزمان در نظر گرفته شوند. برای بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، ۴ شاخص عملکرد که به صورت مبنا در سازه‌های کنترل شده سنجیده می‌شوند، محاسبه و با الگوریتم‌های کنترل فعال تنظیم-پذیر بهینه مرتبه دو و تناسبی، انتگرالی، مشتقی رایج مقایسه می‌شوند.

۲- معادله دینامیکی سازه مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده فعال

معادله حرکت دینامیکی سازه چند درجه آزادی خطی مجهز به سیستم کنترل فعال میراگر جرمی تنظیم شونده تحت تحریک زلزله $\ddot{u}_g(t)$ به شکل رابطه (۱)، بیان می‌شود.

$$[M_T]\{\ddot{u}_T\} + [C_T]\{\dot{u}_T\} + [K_T]\{u_T\} = -[M_T]\{r_T\}\ddot{u}_g(t) + [\gamma]\{f\} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، بردار $\{u_T\}$ از مرتبه $1 \times (n+1)$ است که نشان‌دهنده تغییر مکان نسبی هر طبقه و سیستم میراگر جرمی تنظیم شونده می‌باشد. ماتریس‌های مربع M_T ، C_T و K_T از مرتبه $(n+1) \times (n+1)$ ، ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه مجهز به سیستم کنترل فعال میراگر جرمی تنظیم شونده هستند. r_T بردار ستونی با مقادیر یک، نشان‌دهنده تاثیر تحریک دینامیکی خارجی بر جرم‌های متمرکز سازه مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده فعال است. بردار f بردار نیروی

1. Windup
2. Linear fractional transformation

مطابق رابطه (۶)، مولفه‌های M_M با نامعینی در جرم سیستم سازه‌ای به شکل رابطه (۷) نشان داده می‌شود.

$$M_M = \begin{bmatrix} -r_M & I \\ -\bar{M}_T^{-1} r_M & \bar{M}_T^{-1} \end{bmatrix} \quad (۷)$$

بطور مشابه C_T به صورت تابع کسری خطی بالایی از δ_C با ماتریس تابع انتقال M_C طبق رابطه (۸)، بیان می‌شود.

$$M_C = \begin{bmatrix} 0 & \bar{C}_T \\ r_C & \bar{C}_T \end{bmatrix} \quad (۸)$$

و K_T بصورت تابع کسری خطی بالایی از δ_K با ماتریس تابع انتقال M_K طبق رابطه (۹)، بیان می‌شود.

$$M_K = \begin{bmatrix} 0 & \bar{K}_T \\ r_K & \bar{K}_T \end{bmatrix} \quad (۹)$$

با در نظر گرفتن $X(t) = [u_T \quad \dot{u}_T]^T$ به عنوان متغیر فضای حالت و y به عنوان خروجی اندازه‌گیری، معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم به شکل رابطه (۱۰) نشان داده شده است [۱۸].

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \ddot{X} \\ \dots \\ y_M \\ y_C \\ y_K \\ \dots \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \vdots & B_1 & B_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_1 & \vdots & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & \vdots & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \dot{X} \\ \dots \\ u_M \\ u_C \\ u_K \\ \dots \\ \ddot{u}_g \\ f \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم سازه‌ای کنترل شده با پارامترهای نامعین را با G نشان داده و نمایش فضای حالت آن طبق رابطه (۱۱)، بیان می‌شود.

$$G = \begin{bmatrix} A & \vdots & B_1 & B_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_1 & \vdots & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & \vdots & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (۱۱)$$

$$= \begin{bmatrix} G_{11} & \vdots & G_{12} & G_{13} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{21} & \vdots & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & \vdots & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix}$$

که در آن

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -[\bar{M}_T]^{-1} \bar{K}_T & -[\bar{M}_T]^{-1} \bar{C}_T \end{bmatrix}_{2n_d \times 2n_d}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -[\bar{M}_T]^{-1} r_M & -[\bar{M}_T]^{-1} r_C & -[\bar{M}_T]^{-1} r_K \end{bmatrix}_{2n_d \times 3n_d}$$

سیگنال ورودی و Z سیگنال خروجی تنظیم‌شونده سیستم نامی تعمیم یافته هستند.

رابطه ماتریسی حاکم بر ساختار استاندارد $\Delta - M_\Delta$ در شکل (۱)، به صورت رابطه (۲)، بیان می‌شود.

$$\begin{bmatrix} y_\Delta \\ z \end{bmatrix} = M_\Delta \begin{bmatrix} p \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\Delta \\ w \end{bmatrix} \quad (۲)$$

با بسط رابطه (۲)، ارتباط w و z به صورت رابطه (۳)، بیان می‌شود.

$$z = [M_{22} + M_{21}\Delta(I - M_{11}\Delta)^{-1}M_{12}]w \quad (۳)$$

تبدیل کسری خطی M_Δ و Δ به شکل رابطه (۴)، تعریف می‌شود.

$$F_u(M_\Delta, \Delta) = \frac{M_{22} + M_{21}\Delta(I - M_{11}\Delta)^{-1}M_{12}}{M_{22} + M_{21}\Delta(I - M_{11}\Delta)^{-1}M_{12}} \quad (۴)$$

زیر نویس u در تابع تبدیل $F_u(M_\Delta, \Delta)$ نشان‌دهنده این است که حلقه بالایی M_Δ با Δ احاطه شده است.

در رابطه (۱)، پارامترهای فیزیکی M_T ، C_T و K_T مقدارشان بطور دقیق مشخص نیست، با این وجود طبق رابطه (۵)، می‌توان فرض کرد تغییرات این پارامترها، در محدوده مشخصی است.

$$M_T = (I + r_M \delta_M) \bar{M}_T$$

$$C_T = (I + r_C \delta_C) \bar{C}_T$$

$$K_T = (I + r_K \delta_K) \bar{K}_T \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، $\bar{M}_T$ ، $\bar{C}_T$ و $\bar{K}_T$ به ترتیب، مقادیر اسمی ماتریس جرم، میرایی و سختی سازه مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شونده فعال هستند. δ_M و δ_C و δ_K ماتریس‌های قطری با اعداد تصادفی حقیقی مابین -1 تا +1 هستند. r_C ، r_M و r_K ماتریس‌های قطری با مقادیر ماکزیمم اختلاف بین مقادیر نامعینی‌ها با مقادیر اسمی‌شان هستند.

با توجه به رابطه (۴)، M_T^{-1} به صورت تابع کسری خطی بالایی از δ_M مطابق رابطه (۶) بیان می‌شود.

$$M_T^{-1} = [(I + r_M \delta_M) \bar{M}_T]^{-1} = \bar{M}_T^{-1} [(I + r_M \delta_M) - r_M \delta_M] (I + r_M \delta_M)^{-1} \quad (۶)$$

$$= F_u(M_M, \delta_M)$$

$$= \bar{M}_T^{-1} - \bar{M}_T^{-1} r_M \delta_M (I + r_M \delta_M) I$$

۴- الگوریتم کنترل آنتی‌وینداپ مقاوم PID

تابع تبدیل ساختار موازی کنترل کننده PID، به شکل رابطه (۱۳)، تعریف می‌شود.

$$K(S) = K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S \quad (13)$$

در تابع تبدیل کنترل کننده PID، بخش مشتق‌گیر، یک فیلتر بالا گذر است که باعث تقویت نویزهای فرکانس‌های بالا می‌شود و اگر فرکانس‌های بالا اثر غالبی در خروجی سیستم داشته باشند، می‌تواند تاثیر مخربی بر عملکرد کنترل کننده داشته باشد. برای رفع این مشکل یک فیلتر پایین گذر به بخش مشتق‌گیر اضافه می‌شود. و تابع تبدیل ساختار موازی کنترل کننده PID، به صورت رابطه (۱۴)، اصلاح می‌شود.

$$K(S) = K_p + \frac{K_i}{S} + \frac{K_d}{T_f S + 1} S \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، T_f ثابت زمانی فیلتر پایین گذر مرتبه یک است که باعث فیلتر شدن تغییرات بزرگ در سیگنال خطای ورودی و اصلاح و کاهش دامنه سیگنال کنترلی خروجی و تغییرات آرام آن شود. در الگوریتم کنترل مقاوم PID، هدف یافتن تابع تبدیل مدل کنترل کننده K به شکلی است که نرم بی‌نهایت تابع تبدیل T_{zw} را مینیمم نماید. این تابع تبدیل ارتباط بین سیگنال اغتشاش ورودی به G و سیگنال خروجی هدف از آن را بر حسب مولفه‌های ماتریس G نشان می‌دهد. در رابطه (۱۵)، چگونگی کمینه سازی تابع تبدیل $T_{zw}(s)$ نشان داده شده است.

$$\min_K \|T_{zw}\|_{\infty} = \min_K \|F_u(F_l(G, K), \Delta)\|_{\infty} \quad (15)$$

اصطلاحاً به $F_u(F_l(G, K), \Delta)$ تابع کسری خطی از $F_l(G, K)$ و Δ گفته می‌شود. زیر نویس u نشان‌دهنده این است که حلقه بالایی $F_l(G, K)$ با بلوک نامعینی Δ احاطه شده است. و زیر نویس l نشان‌دهنده این است که حلقه پایینی G با بلوک کنترل‌کننده K احاطه شده است. در شکل (۳)، نمایش استاندارد ساختار $\Delta - G - K$ نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} D_{11} &= \begin{bmatrix} -r_M & -r_C & -r_K \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3n_d \times 3n_d} \\ B_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -[\bar{M}_T]^{-1} M_T r_T & [\bar{M}_T]^{-1} \gamma \end{bmatrix}_{2n_d \times 2} \\ C_2 &= \begin{bmatrix} S & 0 \\ 0 & S \\ -S[\bar{M}_T]^{-1} \bar{K}_T & -S[\bar{M}_T]^{-1} \bar{C}_T \end{bmatrix}_{3 \times 2n_d} \\ D_{21} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -S[\bar{M}_T]^{-1} r_M & -S[\bar{M}_T]^{-1} r_C & -S[\bar{M}_T]^{-1} r_K \end{bmatrix}_{3 \times 3n_d} \\ D_{12} &= \begin{bmatrix} -M_T r_T & \gamma \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{3n_d \times 2} \\ D_{22} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -S[\bar{M}_T]^{-1} M_T r_T & -S[\bar{M}_T]^{-1} \gamma \end{bmatrix}_{3 \times 2} \\ C_1 &= \begin{bmatrix} -\bar{K}_T & -\bar{C}_T \\ 0 & \bar{C}_T \\ \bar{K}_T & 0 \end{bmatrix}_{3n_d \times 2n_d} \\ r_T &= [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1 \quad 1]_{n_d \times 1}^T \\ \gamma &= [0 \quad 0 \quad \dots \quad -1 \quad +1]_{n_d \times 1}^T \end{aligned} \quad (12)$$

S بردار موقعیت سنسور، γ بردار موقعیت عملگر، r_T بردار ضریب تاثیر تحریک زمین لرزه و n_d تعداد درجات آزادی سیستم سازه‌ای مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده فعال می‌باشد.

دیگرام بلوکی G با ملاحظه عدم قطعیت در شکل (۲)، نشان داده شده است.

شکل ۲. دیگرام بلوکی ورودی - خروجی سیستم با ملاحظه عدم قطعیت

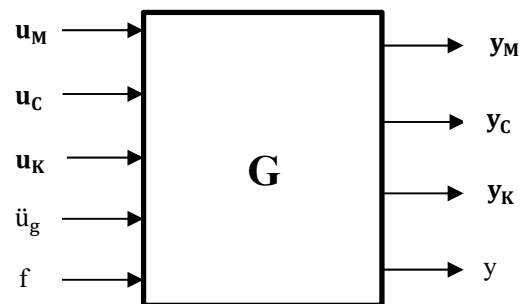


Fig. 2. Input-Output block diagram of the system with uncertainty

$$(G_{12} + G_{13}K(I - G_{33}K)^{-1}G_{32}) \quad (16)$$

پدیده مخرب دیگری که در کنترل کننده PID، ممکن است پیش آید، از یاد نامتعارف انتگرال گیر است. هنگامی که ورودی اعمال شده به سیستم تحت کنترل، اشباع شود و کنترل کننده به انتگرال گیری از خطا ادامه دهد، آنگاه خروجی انتگرال گیر بسیار بزرگ خواهد شد و زمان زیادی برای کاهش دوباره آن نیاز است. برای رفع اثر مخرب پدیده از یاد نامتعارف انتگرال گیر، در ساختار انتگرال گیر کنترل کننده PID، یک فیلتر پایین گذر با ثابت زمانی T_t اعمال می شود. T_t به صورت واسطه هندسی از T_i ، ثابت زمانی بخش انتگرال گیر و T_d ، ثابت زمانی بخش مشتق گیر است که به صورت رابطه (۱۷)، تعریف می شود [19].

$$T_t = \sqrt{T_i \times T_d} \quad (17)$$

در شکل (۴)، ساختار سیستم کنترلی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای فیزیکی سازه تحت کنترل و پدیده Windup در مدل کنترل کننده PID نشان داده شده است.

شکل ۳. ساختار استاندارد $\Delta - G - K$.

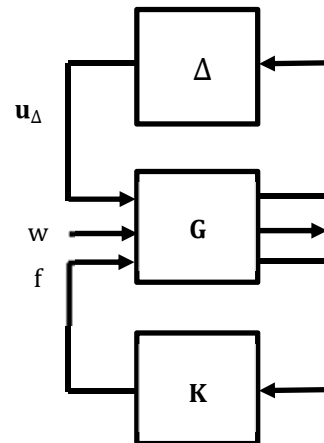


Fig. 3. Standard configuration of $\Delta - G - K$.

با توجه به استاندارد ساختار $\Delta - G - K$ ، مطابق رابطه (۱۶)، T_{zw} بر اساس مولفه های G بدست می آید.

$$\begin{aligned} T_{zw} &= F_u(N, \Delta) = F_u(F_l(G, K), \Delta) \\ &= G_{22} + G_{23}K(I - G_{33}K)^{-1}G_{32} + \\ &G_{21} + G_{23}K(I - G_{33}K)^{-1}G_{31} \times \\ &\Delta(I - (G_{11} + G_{13}K(I - G_{33}K)^{-1}G_{31})\Delta)^{-1} \times \end{aligned}$$

شکل ۴. ساختار سیستم کنترلی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای فیزیکی سازه تحت کنترل و پدیده windup.

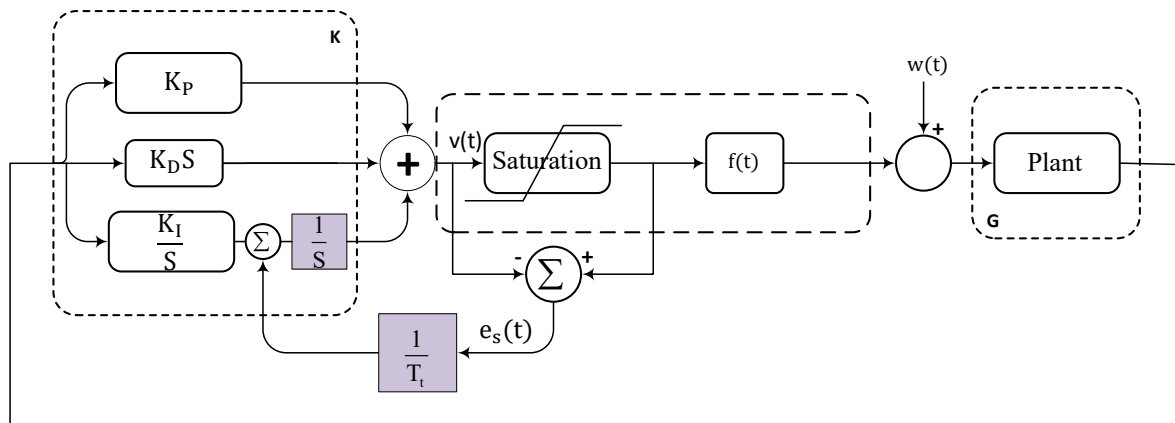


Fig. 4. The structure of the control system taking into account uncertainty in the physical parameters and windup Phenomenon.

$Wunc$ تابع وزنی پروفیل نامعینی، Act_{num} مدل نامی محرک و unc نامعینی ضربی غیر ساختاریافته با نرم بی نهایت کمتر از ۱ است. به منظور برقراری پایداری و

دینامیک های مدل نشده در مدل محرک در شکل (۴)، به صورت نامعینی غیرساختاریافته ضربی مدل می شود.

$$Act = Act_{num} (1 + Wunc \times unc) \quad (18)$$

در جدول (۱)، مقادیر جرم و سختی سازه ۴ طبقه مورد مطالعه، نشان داده شده است.

جدول ۱. مقادیر جرم و سختی سازه ۴ طبقه مورد مطالعه

Stories	Mass(kg)	Stiffness(N/m)
1	542e3	3.5e8
2	542e3	3.5e8
3	542e3	3.5e8
4	514e3	3.5e8

Table 1. Parameters of the 4-story building structure

با حل مساله مقادیر ویژه، فرکانس‌های مود اول و دوم سازه به ترتیب برابر $8/92$ و $25/63$ رادیان بر ثانیه بدست آورده می‌شوند. در ادامه با در نظر گرفتن ۵ درصد برای نسبت میرایی سازه و مقادیر a_0 و a_1 برابر $0/662$ و $0/002$ ، ماتریس میرایی ریلی سازه، به صورت ترکیب خطی از ماتریس‌های جرم و سختی سازه به شکل رابطه (۲۲)، تعیین می‌شود.

$$\begin{aligned} a_0 &= \xi \frac{2w_1w_2}{w_1 + w_2} \\ a_1 &= \xi \frac{2}{w_1 + w_2} \\ C &= a_0M + a_1K \end{aligned} \quad (22)$$

مشخصات رکورد زلزله‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی عددی، در جدول (۲)، آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل تاریخیچه زمانی

Earthquakes	Type	Mw	PGA (g)
El Centro	Far-field	7.1	0.35
Hachinohe	Far-field	7.9	0.23
San Fernando	Far-field	6.6	0.11
Kern County	Far-field	7.3	0.18
Tabas, Iran	Far-field	7.3	0.10
Loma Prieta	Far-field	6.9	0.11
Coalinga-01	Far-field	6.3	0.13
Kobe	Near-field	7.2	0.83
Northridge	Near-field	6.8	0.84
Irpinia, Italy-01	Near-field	6.9	0.32
Landers	Near-field	7.2	0.28
Manjil, Iran	Near-field	7.3	0.51
Chuetsu, Japan	Near-field	6.8	0.45
Corinth, Greece	Near-field	6.6	0.29

Table 2. Characteristics of the selected earthquake records.

پارامترهای جرم میراگر m_{TMD} ، سختی میراگر k_{TMD} و میرایی میراگر c_{TMD} بر حسب متغیرهای نسبت جرمی m_0 ، ضریب نسبت فرکانسی β و نسبت میرایی ξ_{TMD} ، میراگر جرمی تنظیم شونده فعال، به ترتیب به شکل روابط (۲۳-۲۵)، بدست آورده می‌شوند.

کارایی مقاوم سیستم کنترلی، مساله حساسیت مخلوط ۱، به شکل رابطه (۱۹)، تعریف می‌شود.

$$T_{zw} = \left\| \begin{matrix} W_s S \\ W_u K S \\ W T \end{matrix} \right\|_{\infty} \quad (19)$$

W_s, W_u, W, T, S, K به ترتیب تابع وزنی حساسیت، تابع وزنی پروفیل نامعینی، تابع وزنی تلاش کنترلی، تابع تبدیل حساسیت کنترل کننده به نامعینی‌های مدل سازه‌ای، تابع متمم حساسیت کنترل کننده به نامعینی‌های مدل سیستم سازه‌ای و تابع تبدیل کنترل کننده هستند. تابع تبدیل S به شکل رابطه (۲۰) و تابع تبدیل T به شکل رابطه (۲۱) بیان می‌شود.

$$S = (I + GK)^{-1} \quad (20)$$

$$T = GK(I + GK)^{-1} \quad (21)$$

۵- شبیه‌سازی عددی

برای ارزیابی عملکرد روش کنترلی پیشنهادی بهینه و مقاوم PID، از یک سازه ۴ طبقه به صورت قاب برشی با رفتار الاستیک خطی مدلسازی شده و برای کنترل ارتعاشات لرزه‌ای آن از سیستم کنترل میراگر جرمی تنظیم شونده فعال و سنسور سرعت نصب شده در طبقه آخر آن، استفاده می‌شود. سازه ۴ طبقه مورد بررسی، در شکل (۵)، نشان داده شده است [20].

شکل ۵. سازه ۴ طبقه مورد مطالعه [24].

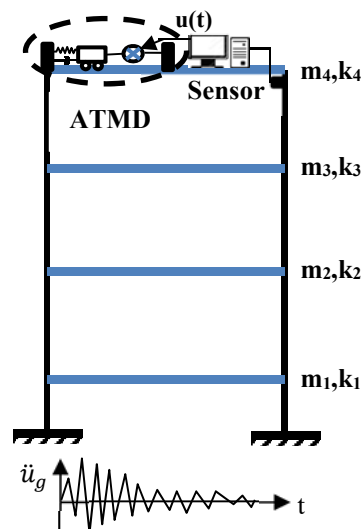


Fig. 5. The model of the example building [24].

1. Mixed Sensitivity Problem

با فرض ثابت زمانی فیلتر پایین گذر T_f برابر ۱، بهره‌های تناسبی K_p ، انتگرالی K_i و مشتقی K_d الگوریتم کنترل مقاوم PID پیشنهادی به شکل رابطه (۲۸)، بدست آورده می‌شوند.

$$\begin{aligned} (K_p)_{\text{robust}} &= 1.11e5 \\ (K_i)_{\text{robust}} &= 1.40e4 \\ (K_d)_{\text{robust}} &= 1.21e4 \end{aligned} \quad (28)$$

در شکل (۶)، نمودار بود تابع تبدیل ۲۰ نمونه از مدل نامعین عملگر به همراه مدل نامی آن نشان داده شده است.

شکل ۶. نمودار بود تابع تبدیل عملگر.

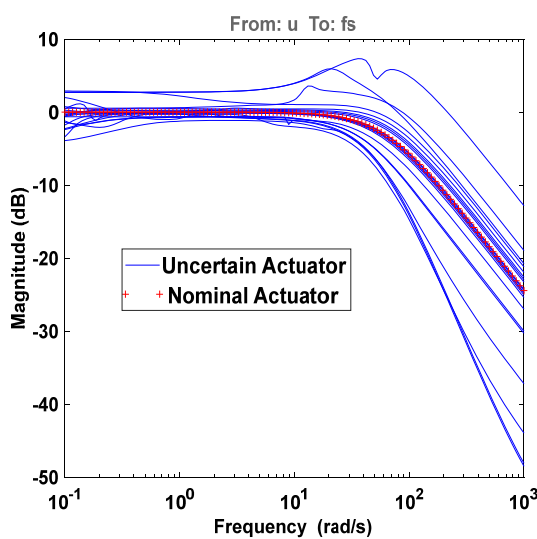


Fig. 6. The bode response of actuator models.

در شکل‌های (۷ و ۸)، به ترتیب نمودارهای پاسخ فرکانسی تغییر مکان طبقه آخر سازه ۴ طبقه مورد مطالعه، در حالت‌های کنترل نشده، کنترل غیر فعال، کنترل فعال LQR، کنترل رایج PID و کنترل فعال مقاوم PID، با در نظر گرفتن ۲۰ درصد عدم قطعیت در سختی طبقات سازه، ۱۰ درصد نویز در سنسور اندازه‌گیری سرعت و نامعینی در مدل عملگر، تحت تحریک زمین لرزه‌های السسترو و کوبه نشان داده شده است.

$$m_{TMD} = m_0 \times m_{\text{building}} \quad (23)$$

$$k_{TMD} = m_{TMD} \times (\beta \times \omega_1)^2 \quad (24)$$

$$c_{TMD} = 2\xi_{TMD} \times \sqrt{m_{TMD} \times k_{TMD}} \quad (25)$$

برای ارزیابی کارایی و پایداری مقاوم کنترل کننده PID پیشنهادی، مقادیر استفاده شده برای پارامترهای کنترل کننده PID کلاسیک، میراگر جرمی تنظیم شونده، توابع وزنی، مدل اسمی تابع تبدیل عملگر و پارامترهای Q و R الگوریتم کنترل فعال تنظیم پذیر بهینه مرتبه دو به شکل رابطه (۲۶)، نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} m_0 &= 0.03, \quad \beta = 1, \quad \xi = 0.28 \\ K_p &= 1e4, \quad K_i = 1.2e4, \quad K_d = 1.1e4, \quad T_f = 0.01 \\ W_s &= \frac{5}{\frac{1}{40}s+1}, \quad W_u = 5 \times 10^{-5}, \quad \text{Actuator}_{\text{num}} = \frac{1}{60s+1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{ii} &= \frac{1}{\max(x_i^2)}, \quad i \in \{1, 2, \dots, 2n_d\} \\ R &= \frac{1}{(5 \times 10^5)^2} \end{aligned} \quad (26)$$

در رابطه (۲۶)، ماکزیمم ظرفیت محرک در تعیین R برابر 5×10^5 نیوتن و پارامترهای کنترل کننده PID کلاسیک با روش جستجوی خطی به شکلی بدست آورده می‌شوند که میانگین جذر مربعات ماکزیمم پاسخ‌های تغییر مکان، سرعت و شتاب طبقات سازه مورد مطالعه را کمینه نماید [21].

برای مدل‌سازی نامعینی در مدل عملگر به صورت نامعینی ساختار نیافته، از تابع وزنی W با تابع تبدیل نشان داده شده در رابطه (۲۷)، استفاده می‌شود.

$$W = \frac{3s + 18.52}{s + 46.29} \quad (27)$$

در رابطه (۲۷)، مدل عملگر بصورت نامعینی ساختار نیافته به گونه‌ای است که در فرکانس‌های زیر ۳ رادیان بر ثانیه، در حدود ۴۰ درصد از مدل اسمی انحراف دارد، اما با افزایش فرکانس از ۳ رادیان بر ثانیه، انحراف آن از مدل اسمی افزایش پیدا می‌نماید، به گونه‌ای که در فرکانس ۱۵ رادیان بر ثانیه به حدود ۱۰۰ درصد می‌رسد.

1. Linear quadratic regulator (LQR)

شکل ۱۰. نمودار جذر میانگین مربعات پاسخ سرعت و شتاب طبقه آخر سازه تحت زلزله کوبه

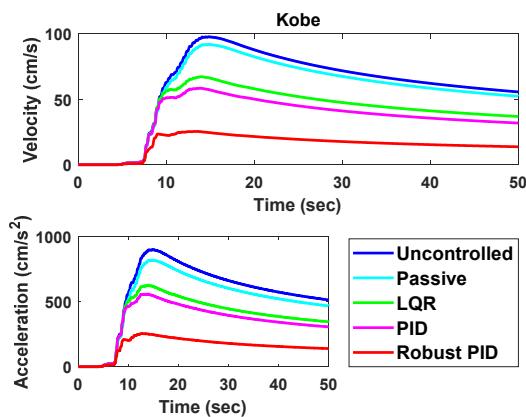


Fig. 10. The RMS responses of the top story velocity and acceleration for the Kobe earthquake.

با توجه به پاسخهای فرکانسی و RMS نشان داده شده در شکل‌های (۷ تا ۱۰)، مشاهده می‌شود بهره تحریک زمین لرزه ورودی در پاسخهای تغییر مکان، سرعت و شتاب طبقه آخر سازه مورد مطالعه، در الگوریتم کنترل مقاوم PID پیشنهادی نسبت به کنترل غیر فعال میراگر جرمی تنظیم شونده، کنترل فعال LQR و PID کلاسیک، کمتر است. در شکل (۱۱) نمودار تاریخچه زمانی نیروی کنترل محاسبه شده با الگوریتم‌های کنترل فعال LQR، PID و الگوریتم کنترل مقاوم PID پیشنهادی، تحت تحریک زمین لرزه‌السترو نشان داده شده است.

شکل ۱۱. نمودار تاریخچه زمانی نیروی کنترل مقاوم محاسبه شده تحت زلزله‌السترو.

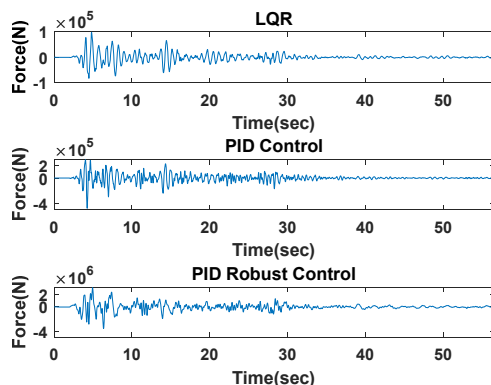


Fig. 11. The required active control force time history for the Elcentro earthquake.

شکل ۷. پاسخ فرکانسی تغییر مکان طبقه آخر سازه تحت زلزله‌السترو.

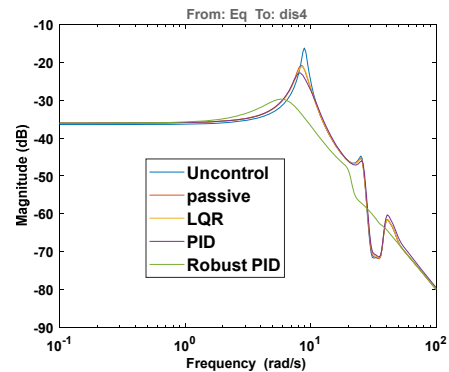


Fig. 7. The frequency responses of the top story displacement for the Elcentro earthquake.

شکل ۸. پاسخ فرکانسی تغییر مکان طبقه آخر سازه تحت زلزله کوبه.

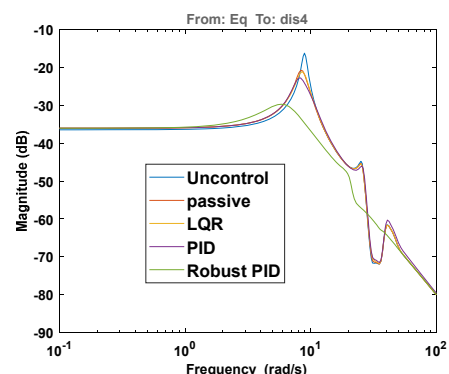


Fig. 8. The frequency responses of the top story displacement for the Kobe earthquake.

در شکل‌های (۹ و ۱۰)، نیز به ترتیب نمودارهای جذر میانگین مربعات پاسخهای سرعت و شتاب طبقه آخر سازه تحت تحریک زمین لرزه‌های‌السترو و کوبه نشان داده شده است.

شکل ۹. نمودار جذر میانگین مربعات پاسخ سرعت و شتاب طبقه آخر سازه تحت زلزله‌السترو

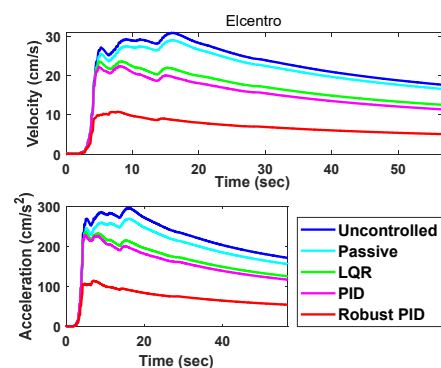


Fig. 9. The RMS responses of the top story velocity and acceleration for the Elcentro earthquake.

1. Root Mean Square (RMS)

شکل ۱۲. نمودار تاریخچه زمانی نیروی کنترل مقاوم محاسبه شده تحت زلزله کوبه.

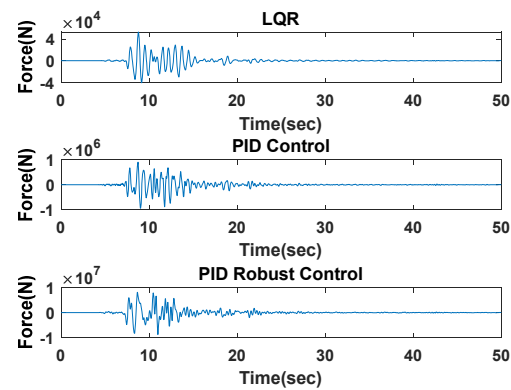


Fig. 12. The required active control force time history for the Kobe earthquake

در شکل (۱۲) نمودار تاریخچه زمانی نیروی کنترل محاسبه شده تحت تحریک زمین لرزه کوبه نشان داده شده است. برای ارزیابی کارایی و پایداری مقاوم کنترل کننده PID، مقاوم پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های کنترل فعال LQR، کنترل رایج PID، از چهار شاخص عملکرد J_1 تا J_4 به شکل رابطه (۲۹)، استفاده می‌شود.

جدول ۳: مقادیر متوسط شاخص‌های عملکرد سازه مورد مطالعه تحت رکورد زلزله‌های دور و نزدیک از گسل.

Models	Controllers	Far Field Earthquakes				Near Field Earthquakes			
		J1	J2	J3	J4	J1	J2	J3	J4
Nominal model	LQR	0.80	0.77	0.85	9.7e-3	0.95	0.93	0.94	2.4e-2
	PID	0.77	0.75	0.81	8.3e-3	0.88	0.91	0.91	2.5e-2
	PID Robust Control	0.72	0.69	0.78	1.3e-2	0.83	0.87	0.87	4.0e-2
Perturbed model 1 $r_M = r_C = 0, r_K = +0.2$	LQR	0.81	0.78	0.88	8.7e-3	0.95	0.95	0.97	2.3e-2
	PID	0.77	0.75	0.83	7.4e-3	0.89	0.92	0.92	2.7e-2
	PID Robust Control	0.73	0.70	0.78	1.3e-2	0.75	0.82	0.86	3.9e-2
Perturbed model 2 $r_M = r_C = 0, r_K = -0.2$	LQR	0.80	0.77	0.86	9.0e-3	0.96	0.95	0.95	2.3e-2
	PID	0.77	0.76	0.83	7.9e-3	0.89	0.92	0.91	2.9e-2
	PID Robust Control	0.72	0.69	0.78	1.3e-2	0.83	0.86	0.85	4.1e-2

Table 3. Mean values of Performance indices for far and near field earthquakes.

LQR و PID رایج در زلزله‌های دور از گسل به ترتیب ۷ و ۵ درصد و در زلزله‌های نزدیک از گسل به ترتیب ۱۲ و ۸ درصد کاهش یافته و مقدار متوسط شاخص عملکرد J_3 در کنترل‌کننده مقاوم PID پیشنهادی نسبت به الگوریتم LQR و PID رایج در زلزله‌های دور از گسل به ترتیب ۱۰ و ۶ درصد و در زلزله‌های نزدیک از گسل به ترتیب ۱۱ و ۸ درصد کاهش یافته است. مقدار متوسط J_4 که نشان‌دهنده میزان تلاش کنترلی است، در کنترل‌کننده مقاوم PID، LQR

با توجه به مقادیر متوسط شاخص‌های عملکرد J_1 تا J_4 در جدول (۵)، مقدار J_1 بطور متوسط در سه مدل اسمی، ۲۰+ و ۲۰- درصد عدم قطعیت در پارامتر سختی تمام طبقات سازه، در کنترل‌کننده مقاوم PID پیشنهادی نسبت به الگوریتم LQR و PID رایج در زلزله‌های دور از گسل به ترتیب ۱۱ و ۷ درصد و در زلزله‌های نزدیک از گسل به ترتیب ۱۷ و ۱۰ درصد، مقدار متوسط شاخص عملکرد J_2 در کنترل‌کننده مقاوم PID پیشنهادی نسبت به الگوریتم

اهمیت باشد.

۷- اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافع وجود ندارد.

۸- مراجع

- [1] Keshtegar, B. and Etedali, S., 2016: Novel mathematical models based on regression analysis scheme for optimum tuning of TMD parameters. *Journal of solid fluid mechanics*, **6**(4), 59-75. (In Persian).
- [2] Mohebbi, M., Shakeri, K. & Majzoub, H., 2012: Genetic Algorithm Based Approach for Optimal Design of Multiple Tuned Mass Dampers (MTMDs) under Earthquake Excitation. *Modares Civil Engineering journal*, **12**(1) (In Persian).
- [3] Pourzeynali, S., Fallah, N., & Akbari, A. M., 2014: Experimental Analysis of the TMD Control of Building Vibrations against Earthquake Excitations. *Journal of civil engineering*, **25**(2), 147-158. (In Persian).
- [4] Katebi, J. & Shoaee-parchin, M., 2017: Design of optimal controller for structures using differential evolution algorithm. *Modares Civil Engineering journal*, **17**(1), 179-191. (In Persian).
- [5] Zhou, K. and Doyle, J.C., 1998: *Essentials of robust control* (Vol. 104). Upper Saddle River, NJ: Prentice hall.
- [6] Zhang, H., Shi, Y. & Mehr, A.S., 2011: Robust static output feedback control and remote PID design for networked motor systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **58**(12), 5396-5405.
- [7] Guclu, R., 2006: Sliding mode and PID control of a structural system against earthquake. *Mathematical and Computer Modelling*, **44**(1-2), 210-217.
- [8] Aguirre, N., Ikhrouane, F. and Rodellar, J., 2011: Proportional-plus-integral semiactive control using magnetorheological dampers. *Journal of Sound and Vibration*, **330**(10), 2185-2200.
- [9] Etedali, S., Sohrabi, M.R. & Tavakoli, S., 2013: Optimal PD/PID control of smart base isolated buildings equipped with piezoelectric friction dampers. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*,

و PID رایج در زلزله‌های دور از گسل به ترتیب $1.3e-2$ ، $9.1e-3$ و $7.9e-3$ و در زلزله‌های نزدیک از گسل به ترتیب $4e-2$ ، $2.4e-2$ و $2.7e-2$ ، بدست آورده شده است. افزایش میزان متوسط شاخص عملکرد J4 در کنترل کننده مقاوم PID پیشنهادی، برای تامین پایداری کنترل کننده مورد نیاز است.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله با ملاحظه عدم قطعیت در پارامتر سختی طبقات سازه و مدل عملکرد و وجود نویز در سنسور اندازه‌گیری سرعت، معادلات دینامیکی ارتعاش سازه چند درجه آزادی مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده فعال برای دستیابی به یک ساختار توسعه یافته مقاوم کنترلر PID در فرم فضای حالت به شکلی پیاده سازی شد تا آثار تمامی مودهای ارتعاشی سازه در تعیین بهره‌های کنترل کننده، بطور هم‌زمان در نظر گرفته شود. برای این منظور از مفاهیم کنترل مقاوم H_∞ ، برای طراحی مقاوم کنترل کننده و کاربرد فیلتر پایین گذر برای ملاحظه اثر پدیده ازدیاد نامتعارف انتگرال‌گیر در مدل کنترل کننده استفاده شد. نیروی کنترل کننده تناسبی، انتگرالی و مشتقی به شکلی بدست آورده شد که نرم بی‌نهایت تابع تبدیل سیستم حلقه بسته از ورودی اغتشاش به خروجی‌های هدف کمینه و کمتر از ۱ شود. با در نظر گرفتن مساله حساسیت مخلوط، کارایی و پایداری مقاوم کنترل کننده مقاوم پیشنهادی تضمین شد. نتایج حاصل از کنترل کننده بهینه مقاوم PID پیشنهادی، در سازه ۱۱ طبقه تحت رکورد زلزله‌های حوزه دور و نزدیک از گسل با الگوریتم‌های کنترل فعال LQR و PID رایج مقایسه شد. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی در حوزه زمان و فرکانس است. افزایش میزان نیروی کنترلی در الگوریتم پیشنهادی، برای تامین پایداری مقاوم کنترل کننده مورد نیاز است. با توجه به ورودی‌های کنترل کننده مقاوم پیشنهادی، نیاز به نصب یک سنسور سرعت است که می‌تواند در عین مقاوم و پایدار بودن، از لحاظ اقتصادی در سازه‌های بلند مرتبه نیز بسیار حائز

- saturation using hedge-algebras-based fuzzy controller. *Journal of Vibration and Control*, **23**(12), 1984-2002.
- [16] Salloum, R., Moaveni, B. & Arvan, M.R., 2015: Identification and robust controller design for an electromechanical actuator with time delay. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, **37**(9), 1109-1117.
- [17] Zhou, K., Doyle, J. C. & Glover, K. 1996: Robust and optimal control. New Jersey: Prentice hall, 146.
- [18] Huo, L., Song, G., Li, H., Grigoriadis, K. 2007: H_∞ Robust control design of active structural vibration suppression using an active mass damper. *Smart materials and structures*, **17**(1), 015021.
- [19] Åström, K. & Hägglund, T. 2005: Advanced PID Control. ISA, Research Triangle Park, NC, 76-80.
- [20] Arfiadi, Y., & Hadi, M. N. S. 2001: Optimal direct (static) output feedback controller using real coded genetic algorithms. *Computers & Structures*, **79**(17), 1625-1634.
- [21] Ogata, K. 2002: Modern control engineering. 5th Edition, Pearson, Upper Saddle River, 583-585.
- 12**(1), 39-54.
- [10] Zamani, A.A., Tavakoli, S. & Etedali, S., 2017: Fractional order PID control design for semi-active control of smart base-isolated structures: a multi-objective cuckoo search approach. *ISA transactions*, **67**, 222-232.
- [11] Heidari, A.H., Etedali, S. & Javaheri-Tafti, M.R., 2018: A hybrid LQR-PID control design for seismic control of buildings equipped with ATMD. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, **12**(1), 44-57.
- [12] Mahmoodabadi, M.J. & Nejadkourki, N., 2020: Optimal fuzzy adaptive robust PID control for an active suspension system. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 1-11.
- [13] Campo, P.J. & Morari, M., 1990: Robust control of processes subject to saturation nonlinearities. *Computers & Chemical Engineering*, **14**(4-5), 343-358.
- [14] Meisami-Azad, M., Grigoriadis, K.M. & Song, G., 2013: Anti-windup linear parameter varying control of structural systems with magneto-rheological dampers. *Journal of Vibration and Control*, **19**(12), 1779-1794.
- [15] Bui, H.L., Nguyen, C.H., Bui, V.B., Le, K.N. & Tran, H.Q., 2017: Vibration control of uncertain structures with actuator

An anti-windup robust PID controller based on H_∞ for structural vibration attenuation

Javad Palizvan Zand¹, Jamshid Sabouri², Javad Katebi^{3*}, Mahdi Nouri⁴

1. Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2. Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

3. Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

4. Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Abstract

Successful implementation of active control technology requires an appropriate control algorithm to calculate the adaptive control force required by the actuators. Smart structures represent a new engineering approach that integrates the actions of digital sensors, actuators and control circuit elements into a single control system that can respond adaptively to environmental stochastic changes in a useful manner. The mathematical model of the system is an estimation of its actual dynamic behavior. In general, this difference can have a significant effect on the performance and stability of the control system. One of the important issues in active control algorithms is the evaluation of the control system's robustness to model uncertainties and the actuator saturation. In this paper, a Developed Robust Proportional Integral Derivative controller with uncertainties in the structural stiffness parameter, the sensing noise and saturation windup of the saturation is introduced. the PID control force is obtained in such a way that the infinity norm of the closed loop system transfer function from disturbance inputs to target outputs becomes minimal. By considering the parametric uncertainty in the structural stiffness parameters and multiplicative unstructured uncertainty and the windup phenomenon in the actuator model and existence of noise in the velocity sensor, PID control scheme has been developed in the form of state space. The PID control gains by taking advantage of the H_∞ mixed sensitivity minimization criterion, are obtained simultaneously by considering the effects of all vibration modes of the building in such a way that the infinity norm of the closed loop transfer function from exogenous inputs to the controlled outputs becomes minimal. To demonstrate the robust performance and stability of the proposed algorithm, the results of numerical simulations on a 4-story structure equipped with an active tuned mass damper are used. The obtained results show the robust performance and stability of the proposed robust PID control scheme in comparison with conventional PID and linear quadratic regulator (LQR) control algorithms, both in time and frequency domains. According to the mean values of performance indices, in average 11 and 7% more reduction in J_1 , 7 and 5% in J_2 and 10 and 6% in J_3 in the proposed robust PID in comparison with the LQR and common PID for three models subjected to far field selected earthquake records. And in average 17 and 10% more reduction in J_1 , 12 and 8% in J_2 and 11 and 8% in J_3 in the proposed robust PID in comparison with the LQR and common PID for three models subjected to near field selected earthquake records. And J_4 which related to amount of control effort, for the proposed robust PID, LQR and conventional PID are $1.3e-2$, $9.1e-3$ and $7.9e-3$ in average for the three models subjected to far field and $4e-2$, $2.4e-2$ and $2.7e-2$ subjected to near field selected earthquake records. The obtained results show the robust performance and stability of the proposed controller in the presence of structural stiffness uncertainties, actuator saturation and measurement noise.

Keyword: robust control, windup phenomenon, infinity norm, H_∞ control algorithm, actuator saturation.