

توسعه‌ی یک سیستم کنترل تطبیقی دولایه‌ی بلادرنگ برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌های

بلندمرتبه با بهره‌گیری از فراسازگاری و الگوریتم جستجوی اکستریم

رسول ثابت‌عهد^{۱*}، ام‌گلنوم جعفرزاده^۲

۱- گروه مهندسی عمران، واحد صوفیان، دانشگاه آزاد اسلامی، صوفیان، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش، یک چارچوب کنترل تطبیقی بلادرنگ با معماری دولایه برای کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های بلند با رفتار غیرخطی ارائه می‌شود. ساختار پیشنهادی شامل یک کنترل‌کننده تطبیقی پایه و یک لایه فراسازگار است که با بهره‌گیری از یک الگوریتم جستجوی اکستریم فیلترگذاری شده، پارامترهای تطبیق را به صورت برخط تنظیم می‌کند. کنترل‌کننده پایه سیگنال کنترلی را بر اساس قوانین تطبیقی خروجی محور تولید کرده و لایه فراسازگار با تخمین لحظه‌ای گرادیان تقریبی تابع عملکرد، جهت و نرخ به‌روزرسانی ضرایب کنترلی را تعیین می‌کند. این سازوکار بدون اتکا به مدل دقیق سازه و بدون نیاز به شناسایی اولیه، امکان سازگاری بلادرنگ با تغییرات ناگهانی یا تدریجی مشخصات دینامیکی، رفتارهای غیرخطی نظیر هیستریزیس و نامعینی‌های ساختاری را فراهم می‌آورد. ساختار iRT-SAC به‌گونه‌ای طراحی شده است که کران‌داری پارامترهای تطبیق و پایداری حلقه‌بسته تحت شرایط عملیاتی دشوار حفظ شود و درعین حال نیاز به بازتنظیم دستی یا بازمدل‌سازی کاهش یابد. برای ارزیابی عملکرد، روش پیشنهادی بر روی سازه پنج‌مارک ۲۰ طبقه ارائه‌شده توسط اوهتوری و همکاران شبیه‌سازی شده و با کنترل‌کننده‌های مرجع از جمله H_∞ ، LQG، کنترل فازی و Clipped-LQG مقایسه شده است. نتایج بیانگر کاهش حدود ۶۰٪ در جابه‌جایی نسبی بین‌طبقه‌ای و حفظ پایداری حلقه‌بسته در حضور عدم قطعیت‌های شدید و رفتار غیرخطی است. به‌طور کلی، iRT-SAC یک چارچوب تطبیقی مدل-آزاد، مقاوم و مناسب برای پیاده‌سازی عملی در سازه‌های بلند و پیچیده محسوب می‌شود.

کلمات کلیدی

کنترل تطبیقی ساده (SAC)، فراسازگاری، کنترل مدل-آزاد، الگوریتم جستجوی اکستریم، سازه پنج‌مارک غیرخطی.

* نویسنده مسئول؛ رایانامه: Rasoul.Sabetahd@iau.ac.ir

بلايای طبیعی نظیر زمین‌لرزه‌ها، طوفان‌ها و بارهای شدید محیطی همواره خسارات گسترده‌ای به زیرساخت‌های عمرانی وارد کرده و موجب تلفات جانی و مالی جبران‌ناپذیر شده‌اند. این پدیده‌ها ضرورت توسعه رویکردهای نوین و مؤثر برای حفاظت از سازه‌ها را به شدت افزایش داده‌اند. در این میان، کنترل سازه‌ای به‌عنوان یکی از راهکارهای کلیدی در کاهش پاسخ‌های دینامیکی و پیشگیری از خرابی‌های شدید، مورد توجه محققان قرار گرفته است. افزون بر ارتقای ایمنی و قابلیت بهره‌برداری، استفاده از سیستم‌های کنترلی می‌تواند به کاهش چشمگیر مصرف مصالح و بهینه‌سازی طراحی منجر شود [۱].

سیستم‌های کنترلی به چهار دسته غیرفعال، فعال، نیمه‌فعال و ترکیبی تقسیم می‌شوند که همگی در کاهش ارتعاشات ناشی از بارهای لرزه‌ای مؤثر شناخته شده‌اند [۲]. سیستم‌های غیرفعال با وجود مزایایی نظیر سادگی طراحی، اجرای آسان و نیاز نداشتن به منبع تغذیه خارجی، به دلیل ثابت بودن ویژگی‌های دینامیکی، پاسخ مناسبی در برابر تحریکات متغیر ندارند. در مقابل، سیستم‌های کنترل فعال با اعمال در زمان واقعی نیروهای کنترلی، توانایی بالایی در کاهش ارتعاشات و افزایش ایمنی سازه‌ها تحت زلزله‌های شدید از خود نشان داده‌اند [۳]. با این حال، این دسته از سیستم‌ها نیازمند طراحی دقیق، مدل‌سازی مناسب و تعیین بهینه ضرایب کنترلی هستند؛ زیرا در صورت انتخاب نادرست این پارامترها، نه تنها عملکرد مناسبی ارائه نمی‌دهند، بلکه می‌توانند موجب ناپایداری سازه و افزایش پاسخ دینامیکی شوند.

به‌منظور رفع محدودیت‌های موجود، در سال‌های اخیر توجه قابل‌ملاحظه‌ای به توسعه‌ی سیستم‌های کنترل هوشمند مبتنی بر یادگیری ماشین، منطق فازی، و شبکه‌های عصبی معطوف شده است. برای نمونه، الیاس^۱ و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که به‌کارگیری روش‌های کنترلی پیشرفته، از جمله LQG، می‌تواند پاسخ دینامیکی سازه‌های بلند را تحت تحریکات پالس مانند به‌طور معناداری کاهش دهد [۴]. همچنین، لی^۲ و همکاران (۲۰۲۳) با بهره‌گیری از روش‌های یادگیری ماشین، یک سیستم کنترل فعال غیرمتمرکز مبتنی بر شبکه‌های عصبی LSTM طراحی کردند و اثبات نمودند که روش‌های داده‌محور می‌توانند موجب کاهش مؤثر پاسخ‌های لرزه‌ای و ارتقای پایداری عملکردی سازه شوند [۵].

کنترل‌کننده‌های فازی و عصبی به دلیل قابلیت تطبیق با شرایط متغیر، یادگیری بلادرنگ، و مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده، گزینه‌های مناسبی برای به‌کارگیری در سیستم‌های کنترل فعال هستند. با این حال، چالش‌هایی نظیر حساسیت به نویز در کنترل فازی، و نیاز به داده‌های آموزشی گسترده در شبکه‌های عصبی، همچنان موانعی در پیاده‌سازی عملی این روش‌ها ایجاد می‌کنند. با توجه به ماهیت پیچیده، غیرخطی و زمان‌متغیر رفتار سازه‌ها در شرایط لرزه‌ای واقعی، استفاده از کنترل‌کننده‌هایی که توانایی تطبیق بلادرنگ با تغییرات سیستم را دارند، به‌عنوان یک نیاز کلیدی مطرح است. در این راستا، رویکردهای کنترل تطبیقی در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته‌اند. به‌عنوان نمونه، اومتلو^۳ و همکاران (۲۰۲۱) با بهره‌گیری از تحلیل پایداری لیاپانوف، کنترل‌کننده تطبیقی مقاومی برای سیستم‌های ATMD ارائه کردند که توانست پایداری دینامیکی سازه‌ها را در برابر تحریکات شدید حفظ کند [۶]. همچنین، ما^۴ و همکاران (۲۰۲۲) با بهینه‌سازی پارامترهای کنترل فازی از طریق تحلیل خوشه‌ای، موفق به کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای شدند [۷]. افزون بر این، عبدالطیف^۵ و حجازی^۶ (۲۰۲۳) یک سیستم کنترل تطبیقی مبتنی بر منطق فازی برای سازه‌های تحت تحریکات لرزه‌ای و بادی ارائه کردند که نتایج مطلوبی به همراه داشت [۸].

با وجود کارایی روش‌های تطبیقی کلاسیک، یکی از محدودیت‌های اساسی آن‌ها وابستگی به انتخاب اولیه و ثابت ضرایب تطبیق است که می‌تواند در شرایط لرزه‌ای شدید موجب کندی همگرایی و کاهش پایداری عملکرد گردد. در سال‌های اخیر، روش جستجوی اکستریم^۷ به‌عنوان یک چارچوب مدل-آزاد برای بهینه‌سازی بلادرنگ پارامترهای کنترلی توجه روزافزونی را به خود جلب کرده است.

¹ Elias

² Li

³ Ümütli

⁴ Ma

⁵ Abdulateef

⁶ Hejazi

⁷ Extremum Seeking; ES

ES قادر است ضرایب کنترلی را بدون نیاز به مدل دقیق در راستای کمینه‌سازی معیارهایی مانند انرژی ارتعاش یا خطای ردیابی تنظیم نماید [۹-۱۱]. این ویژگی، ES را به ابزاری مناسب برای ادغام با کنترل‌های تطبیقی و طراحی کنترل‌کننده‌های هوشمند، مقاوم و مستقل از مدل در سازه‌های غیرخطی تحت تحریکات لرزه‌ای تبدیل کرده است.

با وجود پیشرفت‌های اخیر، بررسی ادبیات نشان می‌دهد که برخی نیازهای کلیدی در کنترل تطبیقی سازه‌های بلند همچنان برآورده نشده‌اند. در سال‌های اخیر، روش‌های کنترل تطبیقی برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها به‌طور گسترده توسعه یافته‌اند. برای نمونه، زیزونی^۱ و همکاران (۲۰۲۲) یک کنترل‌کننده تطبیقی مبتنی بر اسلایدینگ‌مود^۲ را در سازه‌های مجهز به دمپر MR به‌کار گرفته‌اند که، به گزارش نویسندگان، علی‌رغم کاهش قابل توجه ارتعاشات، فاقد سازوکار تنظیم بلادرنگ پارامترها و وزن‌دهی تابع هزینه است [۱۲]. همچنین، الدجاییلی^۳ و همکاران (۲۰۲۳) کنترل تطبیقی سینرژتیک^۴ را برای سیستم‌های نامعین پیشنهاد داده‌اند، اما تمرکز آن‌ها بر مدل‌های ساده و نرخ تطبیق کلاسیک بوده و قابلیت بازپیکربندی دینامیکی در شرایط لرزه‌ای شدید را فراهم نمی‌کند [۱۳]. از نظر تنوع نیز، مطالعات معاصر در کنترل‌کننده‌های مرجع مستقیم تطبیقی^۵ برای سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی^۶ سوئیچ‌شونده نشان داده‌اند که انتخاب مناسب نرخ یادگیری نقش کلیدی در همگرایی نمایی دارد [۱۴، ۱۵]. با این حال، این پژوهش‌ها معمولاً از ضرایب ثابت استفاده کرده و سازوکاری برای بهینه‌سازی بلادرنگ معیار عملکرد در کاربردهای کنترل سازه‌ای ارائه نکرده‌اند. افزون بر این، روش‌های مرجع رایج نظیر LQG، کنترل فازی، Clipped-LQG، کنترل نیمه‌فعال MPC، کنترل نیمه‌فعال H_∞ و OSAC^۷ یا به مدل دقیق سازه وابسته‌اند، یا وزن‌دهی ثابت تابع هزینه دارند و فاقد قابلیت مدل-آزاد برای مواجهه با تغییرات لحظه‌ای رفتار دینامیکی هستند.

در مقابل، کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی *IRT-SAC* با بهره‌گیری از یک لایه‌ی فراسازگار مبتنی بر الگوریتم جستجوی اکستریم، نرخ یادگیری و ضرایب وزنی تابع هزینه چندهدفه را به‌صورت زمان‌وابسته و بلادرنگ بازپیکربندی می‌کند. این تابع هزینه شامل سه مؤلفه‌ی اصلی است: (۱) خطای خروجی RMS، (۲) انرژی سیگنال کنترلی، و (۳) نرخ تغییر پارامترهای تطبیقی، که با ضرایب وزنی α ، β و γ ترکیب می‌شوند. این سازوکار موجب افزایش سرعت همگرایی، بهبود پایداری عددی و افزایش مقاومت در برابر نامعینی‌های ساختاری در تحریکات لرزه‌ای شدید می‌شود.

به‌طور خاص، ترکیب فراسازگاری^۸ با کنترل‌کننده تطبیقی ساده^۹ برای کنترل بلادرنگ سازه‌های بلند تاکنون در ادبیات گزارش نشده و شکاف پژوهشی مهمی را پوشش می‌دهد. بنابراین، نیاز به یک کنترل‌کننده‌ی سازگار با شرایط لحظه‌ای، مستقل از مدل و مجهز به بهینه‌سازی تابع هزینه، همچنان در ادبیات باز است.

با توجه به مرور پژوهش‌های اخیر و تحلیل محدودیت‌های روش‌های تطبیقی موجود، شکاف علمی این پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر جمع‌بندی کرد:

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در روش‌های کنترل تطبیقی، مرور نظام‌مند ادبیات نشان می‌دهد که چندین نیاز کلیدی در کنترل سازه‌های بلند دارای رفتار غیرخطی همچنان برآورده نشده‌اند. نخست آنکه بسیاری از رویکردهای تطبیقی اخیر – از جمله کنترل مبتنی بر اسلایدینگ‌مود [۱۲] و کنترل سینرژتیک [۱۳] – عمدتاً بر تنظیم تطبیقی بهره‌ها متمرکز بوده و سازوکاری برای بازپیکربندی بلادرنگ نرخ یادگیری یا تنظیم تطبیقی وزن‌دهی تابع هزینه چندهدفه ارائه نمی‌کنند.

¹ Zizouni

² Sliding-Mode

³ Al-Dujaili

⁴ Synergetic

⁵ Model Reference Adaptive Controller; MRAC

⁶ Multiple Input, Multiple Output; MIMO

⁷ Online Simple Adaptive Control

⁸ Hyper-Adaptation

⁹ Simple Adaptive Control

افزون بر این، مطالعات تئوریک در چارچوب MRAC برای سیستم‌های چندمتغیره‌ی متغیر با زمان نشان می‌دهد که ثابت بودن نرخ یادگیری می‌تواند موجب کندی همگرایی و افت عملکرد تحت تحریکات شدید شود؛ با این حال، تا جایی که در مرور منابع این پژوهش مشاهده شد، هیچ راهکار عملی و بلادرنگی برای تنظیم تطبیقی نرخ یادگیری در کنترل سازه‌های گزارش نشده است. همچنین، با وجود آنکه الگوریتم‌های جستجوی اکستریم در تنظیم آنلاین پارامترهای برخی سامانه‌های ساده‌تر مانند جذب‌کننده‌های جرمی تنظیم‌شده^۱ موفق بوده‌اند، کاربرد ES در کنار چارچوب‌های تطبیقی استاندارد نظیر SAC برای سازه‌های بلند دارای رفتار غیرخطی – به‌ویژه با هدف تنظیم همزمان ضرایب تطبیقی و وزن‌دهی تابع هزینه – در ادبیات موجود مشاهده نشد. روش‌های مرجع رایج نظیر LQ, H_∞, کنترل فازی، Clipped-LQG و MPC نیز اگرچه در کنترل لرزه‌ای مؤثر بوده‌اند، اما عموماً به مدل دقیق سازه متکی‌اند یا از وزن‌دهی ثابت استفاده می‌کنند و توانایی تطبیق لحظه‌ای در شرایط دینامیکی متغیر سازه را ندارند.

در نتیجه، براساس منابع بررسی‌شده، چارچوبی که بتواند به‌صورت همزمان:

(۱) نرخ یادگیری و ضرایب وزن‌دهی تابع هزینه‌ی چندهدفه را بلادرنگ تنظیم کند،

(۲) مستقل از مدل عمل نماید،

(۳) با نامعینی‌های شدید و رفتار غیرخطی سازگار شود، و

(۴) ساختاری دولایه همراه با فراسازگاری بلادرنگ فراهم آورد،

در ادبیات موجود گزارش نشده است. این مجموعه محدودیت‌ها، شکاف پژوهشی مشخصی را برجسته می‌کند و ضرورت توسعه‌ی یک چارچوب کنترل تطبیقی مدل-آزاد، چندهدفه و مجهز به فراسازگاری بلادرنگ را برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بلند آشکار می‌سازد.

در این پژوهش، یک چارچوب کنترل تطبیقی دولایه هوشمند با عنوان iRT-SAC ارائه شده است که برای نخستین بار، رویکرد SAC را با یک لایه فراسازگار مبتنی بر الگوریتم جستجوی اکستریم ترکیب می‌کند. این ساختار، نرخ یادگیری و ضرایب تابع هزینه چندهدفه را به‌صورت بلادرنگ و خودکار تنظیم کرده و عملکرد پایدار و کارآمدی در مواجهه با شرایط غیرخطی، نامعین و تحریکات لرزه‌ای شدید ارائه می‌دهد.

ویژگی متمایزکننده iRT-SAC نسبت به روش‌های مرجع مانند SAC کلاسیک، OSAC و Clipped-LQG، تلفیق ساختار دولایه با بازپیکربندی پویا و بلادرنگ نرخ یادگیری و تابع هزینه است که موجب افزایش همگرایی سریع‌تر و پایداری عددی بالاتر کنترل‌کننده می‌شود. این چارچوب مدل-آزاد، چندهدفه و بلادرنگ، بدون نیاز به بازمدل‌سازی مکرر یا مداخلات انسانی، فرآیند تنظیم و بهینه‌سازی ضرایب کنترلی را بر اساس بازخوردهای عملکردی انجام می‌دهد و موجب ارتقای پایداری عملکردی، تاب‌آوری و کارایی سیستم کنترل در برابر تحریکات پیچیده و نامعین می‌گردد.

بنابراین، iRT-SAC گامی مؤثر در توسعه سیستم‌های هوشمند، مقاوم و کارآمد برای حفاظت لرزه‌ای سازه‌های بلند محسوب می‌شود و کمبودهای روش‌های موجود در ادبیات کنترل سازه‌ای را برطرف می‌کند.

به‌منظور مقایسه‌ی جایگاه پژوهش حاضر با مهم‌ترین مطالعات پیشین روی سازه‌ی بنچمارک غیرخطی ۲۰ طبقه، جدول زیر ارائه شده است. این جدول نوع کنترل، میزان تطبیق‌پذیری، قابلیت بلادرنگ، و ویژگی‌های اصلی روش‌های مرجع را خلاصه می‌کند و موقعیت پژوهش حاضر را در میان مطالعات موجود مشخص می‌نماید.

جدول ۱: مقایسه‌ی مطالعات مرجع در زمینه‌ی کنترل فعال و تطبیقی سازه‌ی بنچمارک ۲۰ طبقه

Table 1. Comparison of reference studies on active and adaptive control of the 20-story benchmark structure

مرجع	روش کنترل	قابلیت تطبیق	قابلیت بلادرنگ	نوع کنترل
Ohtori et al. [۱۶]	LQG / Passive	ندارد	آفلاین	غیرفعال / کلاسیک
Bitaraf & Hurlbaeus [۱۷]	SACM برای میراگر نیمه‌فعال MR	بله (تنظیمات SACM)	آنلاین	نیمه‌فعال تطبیقی

¹ Tuned Vibration Absorber; TVA

Azizi et al.[۱۸]	کنترل فعال با طراحی فازی/کنترل کننده‌هایی که با Grey Wolf Optimizer (GWO) بهینه‌سازی شده‌اند.	محدود (پارامترها از طریق بهینه‌سازی آفلاین تعیین می‌شود).	طراحی پارامترها آفلاین (GWO)؛ پیاده‌سازی کنترل می‌تواند بلادرنگ باشد.	فعال
Sabetahd et al.[۱۹]	SAC با تنظیم تطبیقی پارامترها با EKF	بله، تطبیق پذیری محدود	آنلاین	تطبیقی ساده
پژوهش حاضر	iRT-SAC (ES + فراسازگار)	تطبیق پذیری کامل	بلادرنگ	فعال تطبیقی دولایه

۲- توسعه کنترل کننده تطبیقی ساده با قابلیت سازگاری بلادرنگ

در این پژوهش، یک کنترل کننده تطبیقی بهبودیافته با قابلیت تطبیق بلادرنگ بر اساس چارچوب کنترل تطبیقی ساده^۱ (iRT-SAC) توسعه داده شده است. این روش که در دسته کنترل کننده‌های مرجع مستقیم تطبیقی قرار می‌گیرد، با هدف بهبود عملکرد حلقه بسته در شرایط پارامترهای متغیر با زمان و مواجهه با عدم قطعیت‌های سازه‌ای طراحی شده است. روش SAC که نخستین بار توسط سوبل^۲ و همکاران (۱۹۷۷) تحت عنوان کنترل تطبیقی مرجع مستقیم معرفی شد، امکان تنظیم خودکار و بلادرنگ بهره‌های کنترلی بدون نیاز به شناسایی صریح پارامترهای پلنت را فراهم می‌آورد [۱۷، ۲۰]. این ویژگی SAC را برای سیستم‌هایی با دینامیک پیچیده و مدل‌سازی دشوار مناسب می‌سازد. در ادامه، بار-کانا^۳ و همکاران (۱۹۹۳) الگوریتم SAC را برای پشتیبانی قابل اعتماد از ساختارهای چندورودی-چندخروجی توسعه دادند که موجب افزایش مقیاس پذیری و مقاومت کنترل کننده تطبیقی در برابر چالش‌های ناشی از ابعاد بالای سیستم گردید [۲۱، ۲۲].

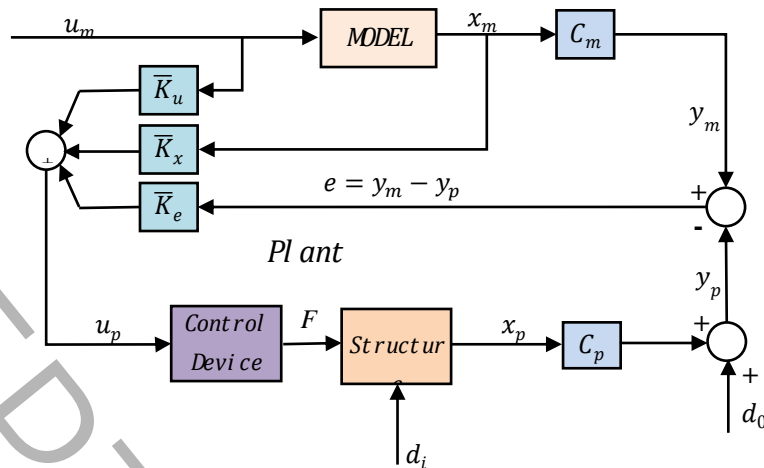
نکته کلیدی در روش‌های کنترل تطبیقی مستقیم مانند SAC این است که فرآیند سازگاری و تنظیم بهره‌ها بدون نیاز به محاسبه یا شناسایی صریح پارامترهای سازه‌ای سیستم کنترل شونده انجام می‌شود. بدین معنا که این روش نیازمند شناسایی دقیق یا مدل‌سازی کامل سیستم تحت کنترل (که به عنوان پلنت شناخته می‌شود) نیست. در عوض، این روش می‌تواند بهره‌های کنترلی مورد نیاز را بدون مدل‌سازی صریح سیستم، برای ردیابی رفتار مطلوب سیستم تعیین کند.

هدف اصلی کنترل کننده SAC، تطبیق خروجی‌های سیستم واقعی با رفتار سیستم ایده‌آل است که به آن مدل مرجع یا مدل مطلوب گفته می‌شود. این فرآیند تطبیق به‌ویژه زمانی که سیستم تحت تغییرات یا اغتشاشات قرار می‌گیرد، کاربردی خواهد بود. یکی از مزایای مهم روش SAC این است که می‌تواند مرتبه مدل مرجع را کمتر از مرتبه سیستم واقعی قرار دهد، بدین معنی که نیازی به مدل‌سازی پیچیده یا دقیق سیستم نداریم [۲۳]. به همین دلیل، روش SAC برای کاربردهایی که مدل‌سازی آن‌ها دشوار یا ناشناخته است، گزینه‌ای بسیار مناسب محسوب می‌شود. نمودار بلوکی مربوط به SAC در شکل ۱ نشان داده شده است [۲۴]. این نمودار نشان می‌دهد که در این روش، کنترل کننده به صورت مستقیم و به‌طور تطبیقی پارامترهای کنترلی را تنظیم می‌کند تا به هدف مطلوب (مدل مرجع) برسد.

¹ Improved Real-Time Simple Adaptive Control

² Sobel

³ Bar-Kana



شکل ۱: نمودار بلوکی کنترل کننده تطبیقی SAC
Figure 1. Block diagram of the SAC adaptive controller

رفتار دینامیکی سازه کنترل شده^۱ در قالب فضای حالت به صورت زیر نمایش داده می شود (مطابق شکل ۱) [۲۲، ۲۱]:

$$\dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u_p(t) + d_i(t) \quad (۱)$$

$$y_p(t) = C_p x_p(t) + d_0(t) \quad (۲)$$

در این معادلات، بردار حالت سیستم با ابعاد $n \times 1$ ، u_p بردار ورودی کنترلی با ابعاد $m \times 1$ و بردار خروجی سیستم با ابعاد $q \times 1$ را نشان می دهد. همچنین، A_p ماتریس حالت با ابعاد $n \times n$ ، B_p ماتریس ورودی با ابعاد $n \times m$ و C_p ماتریس خروجی با ابعاد $q \times n$ است. بر اساس معادلات فوق، $d_i(t)$ اغتشاشات خارجی است که به سیستم اعمال می شود، در حالی که $d_0(t)$ اغتشاشاتی است که ناشی از سنسورهای اندازه گیری هستند [۲۲، ۲۳]. مدل مرجع در فضای حالت به صورت زیر تعریف می شود [۲۲]:

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m u_m(t) \quad (۳)$$

$$y_m(t) = C_m x_m(t) \quad (۴)$$

در این روابط، بردار حالت مدل مرجع با ابعاد $n_m \times 1$ ، u_m بردار ورودی کنترلی با ابعاد $m \times 1$ و بردار خروجی مدل مرجع با ابعاد $q \times 1$ را نشان می دهد. علاوه بر این، A_m ماتریس حالت با ابعاد $n_m \times n_m$ ، B_m ماتریس ورودی با ابعاد $n_m \times m$ و C_m ماتریس خروجی با ابعاد $q \times n_m$ است [۲۲، ۲۳]. مرتبه مدل مرجع n_m می تواند برابر یا کمتر از مرتبه سیستم واقعی n باشد، که موجب سادگی در طراحی می شود. این مقدار باید به اندازه ای باشد که عملکرد مطلوب برای سیستم کنترل شده را تضمین کند [۲۵، ۲۶]. لازم به ذکر است که مدل مرجع تنها نشان دهنده رفتار مطلوب مورد نظر طراحان است و نیازمند دانش پیشین از پارامترهای دینامیکی سیستم کنترل شده نیست [۲۷].

هدف اصلی این پژوهش، کاهش خطای رهگیری خروجی سیستم نسبت به مدل مرجع در شرایط وجود اغتشاشات و عدم قطعیت های دینامیکی است. کنترل کننده تطبیقی ساده (SAC) به گونه ای طراحی شده است که این خطا (اختلاف بین خروجی مدل مرجع و خروجی سیستم کنترل شده) را به صورت مجانبی به صفر برساند. برای تحقق این هدف، سیگنال های کنترلی بر اساس اطلاعات موجود از مدل مرجع و با استفاده از ساختار پیش خور محاسبه می شوند [۲۱، ۲۸]. معادله خطای رهگیری به صورت زیر تعریف می شود:

$$e_y(t) = y_m(t) - y_p(t) \quad (۵)$$

^۱ Plant

سیگنال کنترلی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$u_p(t) = \bar{K}_e(t)e_y(t) + \bar{K}_x(t)x_m(t) + \bar{K}_u(t)u_m(t) = \bar{K}(t)\bar{r}(t) \quad (6)$$

در حضور اغتشاشات، ممکن است مقدار مؤلفه‌های بردار $\bar{r}(t)^T$ در معادله (6) کاهش یابد، که این امر می‌تواند بر اثربخشی سیگنال کنترلی تأثیر بگذارد. که در آن، بردارهای بهره کنترلی و بردار مرجع به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$\bar{K}(t) = [\bar{K}_e(t) \quad \bar{K}_x(t) \quad \bar{K}_u(t)] \quad (7)$$

$$\bar{r}(t)^T = [e_y(t) \quad x_m(t) \quad u_m(t)]^T \quad (8)$$

این روابط نشان می‌دهند که کنترل کننده از ترکیب خطای رهگیری، حالت‌های مدل مرجع، و ورودی‌های آن برای تولید سیگنال کنترلی استفاده می‌کند.

بر اساس معادلات ارائه شده، ماتریس بهره کنترلی پایدارکننده متغیر با زمان، با $\bar{K}_e(t)$ نشان داده می‌شود. شایان ذکر است که تنها عبارت نخست در معادله (6)، یعنی $\bar{K}_e(t)e_y(t)$ برای تضمین پایداری سیستم کنترلی کافی است. در نتیجه، $\bar{K}_x(t)$ و $\bar{K}_u(t)$ بیانگر بهره‌های کنترلی پیش‌خور متغیر با زمان هستند که جهت کاهش خطای رهگیری خروجی به صفر مورد استفاده قرار می‌گیرند. این بهره‌های کنترلی توسط روش کنترل تطبیقی ساده تولید شده تا پایداری سیستم کنترل شده را تضمین کرده و خطای رهگیری را به صورت مجانبی کاهش دهند [29, 30].

بر اساس معادله (9)، مدل مرجع به گونه‌ای انتخاب شده است که مقدار خروجی y_m در هر لحظه و تحت ورودی‌های ناشناخته‌ی u_m در بازه $-\bar{Y}_{max} \leq y_m \leq \bar{Y}_{max}$ باقی بماند. در این مدل، فرض بر این است که شتاب زلزله توسط هیچ حسگری اندازه‌گیری نمی‌شود. بنابراین، عبارت $\bar{K}_u(t)u_m(t)$ در تولید فرمان کنترلی حذف می‌شود. معادلات مدل مرجع به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$x_m = \begin{bmatrix} \bar{q}_m \\ \dot{\bar{q}}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int \dot{\bar{q}}_m dt \\ \dot{\bar{q}}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int y_m dt \\ y_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$y_m = y_p \quad \text{if } |y_p| < \bar{Y}_{max}$$

$$y_m = \text{sign}(y_p)y_{max} \quad \text{if } |y_p| \geq \bar{Y}_{max}$$

در این روابط، \bar{q}_m و $\dot{\bar{q}}_m$ به ترتیب بیانگر جابجایی و سرعت مدل مرجع هستند. مقدار حداکثر خروجی مدل، \bar{Y}_{max} می‌تواند هر مقداری برابر یا بزرگ‌تر از صفر داشته باشد. مقدار بهینه‌ی \bar{Y}_{max} وابسته به هدف کنترل، دامنه پاسخ مجاز، و محدودیت‌های عملکردی سازه تعیین می‌شود. در این پژوهش، فرض بر آن است که \bar{Y}_{max} برابر صفر باشد، تا جابجایی طبقه فوقانی سازه تا حد امکان کاهش یابد.

بهره‌های کنترلی تطبیقی $\bar{K}(t)$ را می‌توان با ترکیب اجزای انتگرالی و تناسبی به دست آورد [28, 21]:

$$\bar{K}(t) = K_I(t) + K_p(t) \quad (10)$$

که در آن:

$$\dot{K}_I(t) = e_y(t)\bar{r}(t)^T\bar{\Gamma}_I - \bar{\sigma}K_I(t) \quad (11)$$

$$K_p(t) = e_y(t)\bar{r}(t)^T\bar{\Gamma}_p \quad (12)$$

در طراحی کنترل کننده، پارامترهای موجود در معادلات (11) و (12) باید به درستی تنظیم شوند. فرآیند انتخاب این پارامترها معمولاً به صورت آزمون و خطا انجام شده و نیازمند تحلیل‌های حساسیت متعددی است، که ممکن است تردیدهایی در مورد بهینه بودن مقادیر انتخاب شده ایجاد کند [29, 30]. در معادله (11)، یک ماتریس قطری مثبت معین است که نرخ تطبیق بهره‌های کنترلی را تعیین

می‌کند. همچنین، $\bar{\Gamma}_p$ یک ماتریس ضرایب ثابت است. لازم به ذکر است که عبارت $\bar{K}_p(t)$ که به‌عنوان بهره‌ی تناسبی شناخته می‌شود، در مواجهه با خطاهای بزرگ به‌سرعت سیستم را به سمت خطاهای کوچک هدایت می‌کند [۲۸، ۲۱].

علاوه بر این، $\bar{\sigma}$ یک ماتریس اصطلاح فراموشی در معادله فوق است که از واگرایی بهره‌ی انتگرالی در شرایط اغتشاش جلوگیری می‌کند. صرف‌نظر از مقدار $\bar{\sigma}$ ، بهره‌ی انتگرالی $\bar{K}_I(t)$ به‌عنوان یک انتگرال‌گیر کامل عمل کرده و در شرایطی که رهگیری کامل (یعنی $e_y = 0$) امکان‌پذیر نباشد، ممکن است به‌طور نامحدود افزایش یابد. این مسئله می‌تواند منجر به مقادیر بیش از حد بزرگ یا حتی واگرایی شود [۲۲]. لازم به ذکر است که تنها اجزای تطبیقی انتگرالی در معادله (۱۰) پایداری الگوریتم تطبیقی مستقیم را تضمین می‌کنند. به‌منظور افزایش نرخ همگرایی سیستم حلقه‌بسته به سمت رهگیری کامل، اجزای تطبیقی تناسبی به سیستم اضافه می‌شوند [۲۸، ۲۱]. در این روابط، e_y خطای سیگنال خروجی، $\bar{\Gamma}(t)$ بردار ورودی‌های فیدبک و $\bar{\Gamma}_p$ ، $\bar{\Gamma}_I$ و $\bar{\sigma}$ به ترتیب ضرایب نرخ تطبیق برای بخش‌های انتگرالی، تناسبی و ضریب فراموشی هستند.

در این پژوهش، با هدف ارتقای کارایی و افزایش تطبیق‌پذیری، برخلاف روش‌های کلاسیک که ضرایب تطبیقی به‌صورت ثابت یا براساس تنظیمات اولیه انتخاب می‌شوند، کنترل‌کننده‌ای نوین مبتنی بر فراسازگاری و تکنیک جستجوی اکستریم توسعه داده شده است، که طی آن، ضرایب تطبیقی شامل پارامترهای ماتریس $\bar{\sigma}$ و ماتریس‌های قطری $\bar{\Gamma}_I$ و $\bar{\Gamma}_p$ به‌طور بلادرنگ و تطبیقی بهینه‌سازی و به‌روزرسانی می‌شوند. به منظور ارتقای عملکرد سیستم کنترلی، یک معماری دو لایه طراحی گردیده است که شامل ترکیب کنترل تطبیقی ساده، تکنیک فراسازگاری و الگوریتم جستجوی اکستریم می‌باشد:

- لایه نخست مسئول تطبیق بلادرنگ بهره‌های کنترلی $\bar{K}(t)$ بر مبنای شاخص‌های عملکردی سیستم است.
 - لایه دوم نرخ‌های تطبیق کنترل‌کننده را به کمک ترکیب فراسازگاری و تکنیک ES به‌صورت خودکار تنظیم و بهینه می‌کند.
- این معماری دو لایه موجب افزایش سرعت همگرایی، بهبود استحکام سیستم در برابر اغتشاشات محیطی و ارتقای تطبیق‌پذیری در مواجهه با تغییرات دینامیکی و نامعینی‌های سیستم می‌شود. به کمک این کنترل‌کننده، بهینه‌سازی ضرایب تطبیقی بدون نیاز به بازمدل‌سازی مکرر یا مداخلات انسانی صورت گرفته و پایداری و کارایی سیستم در شرایط پیچیده تضمین می‌گردد. فرمول‌بندی به‌روزرسانی ضرایب به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\dot{\bar{\Gamma}}_I(t) = f_{ES}(J(t)) \quad (13)$$

$$\dot{\bar{\Gamma}}_p(t) = f_{ES}(J(t)) \quad (14)$$

$$\dot{\bar{\sigma}}(t) = f_{ES}(J(t)) \quad (15)$$

که در آن:

$J(t)$ تابع هزینه مبتنی بر عملکرد کنترل است.

f_{ES} یک تابع تطبیقی براساس جستجوی اکستریم است که بهینه‌سازی بلادرنگ ضرایب را بدون نیاز به مدل‌سازی دقیق انجام می‌دهد.

به‌منظور ارزیابی همزمان دقت رهگیری، مصرف انرژی کنترلی و پایداری ضرایب تطبیقی، تابع هزینه $J(t)$ به صورت زیر تعریف شده است:

$$J(t) = \alpha \cdot \text{RMS}(e_y(t)) + \beta \cdot \|u_p(t)\|^2 + \gamma \cdot \|\dot{K}(t)\|^2 \quad (16)$$

که در آن:

$\text{RMS}(e_y(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\max(0, t-T)}^t e_y^2(\tau) d\tau}$ میانگین مربعات خطای خروجی در بازه زمانی T می‌باشد؛ (نقش: کاهش انحراف خروجی از مدل مرجع)

$u_p(t)$ انرژی لحظه‌ای سیگنال کنترلی است؛ (نقش: جلوگیری از مصرف انرژی بیش از حد)

$\dot{K}(t)$ نرخ تغییر پارامترهای تطبیقی می‌باشد. (نقش: جلوگیری از نوسانات شدید در بهره‌ها)

در رابطه‌ی (۱۶)، ضرایب وزنی α ، β و γ پارامترهای بی‌بعدی هستند که نقش آن‌ها ایجاد توازن بین سه شاخص عملکردی اصلی کنترل‌کننده است:

- α : ضریب وزنی دهی به جزء خطای رهگیری $RMS(e_y(t))$ است و میزان اهمیت دقت رهگیری خروجی با مدل مرجع را تعیین می‌کند. افزایش مقدار α موجب بهبود دقت رهگیری و کاهش جابجایی بین‌طبقه‌ای می‌شود.
- β : وزنی دهی به انرژی لحظه‌ای سیگنال کنترلی $u_p(t)$ است و برای محدودسازی نیرو و توان مصرفی عملگرها در نظر گرفته می‌شود؛ افزایش β مصرف انرژی را کاهش می‌دهد، اما ممکن است دقت رهگیری اندکی افت کند.
- γ : وزنی دهی به نرخ تغییر پارامترهای تطبیقی $\dot{K}(t)$ است؛ مقدار کوچک‌تر γ از نوسانات سریع و رفتار ناپایدار در حلقه‌ی تطبیق جلوگیری کرده و به پایداری عددی بهتر منجر می‌شود.

برای تعیین مقادیر مناسب این ضرایب، یک تحلیل حساسیت مقدماتی انجام شد که طی آن هر ضریب در یک بازه مشخص تغییر داده شد ($\alpha: 5 - 20$, $\beta: 0.5 - 5$, $\gamma: 0.01 - 0.5$) و اثر آن بر سه معیار دقت رهگیری، انرژی کنترلی، و دامنه نوسان نرخ تغییر پارامترهای تطبیقی ارزیابی گردید. این بازه‌ها با هدف تضمین پایداری عددی، سرعت همگرایی و عملکرد مناسب کنترل‌کننده انتخاب شده‌اند. نتایج این تحلیل نشان داد که نسبت تقریبی $\alpha:\beta:\gamma \approx 10:1:0.1$ بیشترین سازگاری را با اهداف چندگانه کنترل داشته و یک ناحیه تعادلی مناسب میان دقت، انرژی و پایداری ایجاد می‌کند.

این ضرایب در تمامی شبیه‌سازی‌ها ثابت نگه داشته شده‌اند تا قابلیت مقایسه نتایج، پایداری لایه‌ی SAC، و رفتار همگرا در لایه iRT تضمین شود.

بهینه‌سازی ضرایب تطبیقی در ساختار پیشنهادی با استفاده از الگوریتم جستجوی اکستریم انجام می‌شود. این الگوریتم، بدون نیاز به مدل دقیق دینامیکی، به صورت برخط ضرایب را بهینه کرده و موجب افزایش تطبیق‌پذیری و بهبود عملکرد کنترلی می‌شود. در بسیاری از سیستم‌های کنترل پیشرفته، دستیابی به بهینه‌سازی ضرایب بدون در اختیار داشتن مدل دقیق دینامیکی یک چالش اساسی است. الگوریتم ES این محدودیت را مرتفع کرده و امکان بهینه‌سازی پارامترها را صرفاً بر پایه‌ی مشاهدات خروجی فراهم می‌کند.

فرآیند به‌روزرسانی ضرایب مطابق فرمول زیر تعریف می‌شود:

$$f_{ES}(J(t)) = -\eta \frac{\partial J(t)}{\partial \theta_i} \cdot \sin(\omega t), \quad \theta_i \in \{\bar{\Gamma}_l, \bar{\Gamma}_p, \bar{\sigma}\} \quad (17)$$

که در آن η نرخ یادگیری^۱ و ω فرکانس تحریک^۲ می‌باشد. مراحل الگوریتم ES عبارتند از:

۱-۲- تحریک سیستم

به منظور تحریک سیستم و امکان تخمین گرادینان، به هر یک از پارامترهای تطبیقی $\theta_i \in \{\bar{\Gamma}_l, \bar{\Gamma}_p, \bar{\sigma}\}$ یک نوسان سینوسی کوچک اعمال می‌شود:

$$\theta_i(t) = \theta_{0,i} + \alpha \cdot \sin(\omega t) \quad (18)$$

که در آن α دامنه تحریک و ω فرکانس تحریک می‌باشد.

۲-۲- اندازه‌گیری تغییرات تابع هزینه

در پاسخ به تحریک‌های اعمال شده، تغییرات مقدار تابع هزینه $J(t)$ اندازه‌گیری می‌شود تا بتوان تأثیر نوسان روی عملکرد سیستم را ارزیابی کرد.

¹ Learning Rate

² Modulation Frequency

۳-۲- تخمین گرادیان

گرادیان تابع هزینه نسبت به هر پارامتر تطبیقی از طریق تقریب مشتق مرکزی^۱ تخمین زده می‌شود:

$$\frac{\partial J(t)}{\partial \theta} \approx \frac{J(\theta_i + \delta) - J(\theta_i - \delta)}{2\delta} \quad (19)$$

که در آن δ مقدار کوچک تغییر در پارامتر تطبیقی است.

۴-۲- به‌روزرسانی بلادرنگ ضرایب تطبیقی

مقادیر پارامترهای تطبیقی با استفاده از یک نرخ یادگیری تطبیقی پیشرفته به صورت زیر به‌روزرسانی می‌شوند:

$$\theta_i(t+1) = \theta_i(t) - \eta_0 \cdot \exp(-\lambda \|\nabla J(t)\|^2) \cdot \frac{\partial J(t)}{\partial \theta_i} \quad (20)$$

که در آن η_0 نرخ پایه‌ی یادگیری^۲، λ ضریب تنظیم نرخ یادگیری^۳ و $\nabla J(t)$ گرادیان تابع هزینه می‌باشد.

انتخاب مقادیر مناسب برای η_0 و λ اهمیت بسزایی در تضمین همگرایی سریع و پایدار الگوریتم داشته و به طور تجربی یا از طریق تحلیل حساسیت تعیین می‌شود.

از آنجا که قوانین تطبیق در لایه ES صرفاً شامل به‌روزرسانی اسکالر تعداد محدودی پارامتر بوده و فاقد هرگونه وارون‌سازی ماتریسی یا محاسبات وابسته به بُعد سیستم است، مرتبه محاسباتی این بخش از الگوریتم ثابت باقی می‌ماند.

به‌روزرسانی پارامترهای تطبیقی هر ۵ گام زمانی ($\Delta t \approx 0.025 s$) انجام می‌شود تا تخمین گرادیان مبتنی بر تحریک سینوسی پایدار باقی بماند. تحلیل پاسخ سیستم نشان می‌دهد که ضرایب تطبیقی طی حدود ۲-۳ ثانیه به ناحیه پایدار همگرا می‌شوند. این بازه‌ی زمانی همگرایی در تمامی رکوردهای زلزله‌ی مورد استفاده در این پژوهش به‌صورت یکنواخت مشاهده شد که نشان‌دهنده پایداری عددی و قابلیت اعتماد الگوریتم پیشنهادی است. پیچیدگی محاسباتی الگوریتم در هر گام زمانی مستقل از مرتبه سازه و از نوع $O(1)$ است و زمان اجرای آن بسیار کمتر از گام نمونه‌برداری کنترل برآورد می‌شود؛ بنابراین استفاده از آن در پیاده‌سازی بلادرنگ امکان‌پذیر است. در کنترل‌کننده SAC توسعه‌یافته، ماتریس‌های Γ ، نرخ یادگیری η و ضرایب λ به‌صورت بلادرنگ و تطبیقی توسط الگوریتم ES به‌روزرسانی می‌شوند.

- **ماتریس Γ :** هر عنصر ماتریس Γ دارای یک مقدار اولیه متوسط است که الگوریتم برای شروع به آن نیاز دارد و سپس در طول شبیه‌سازی به صورت تطبیقی به‌روزرسانی می‌شود.
 - **نرخ یادگیری η و ضریب λ :** این پارامترها اسکالر بوده و برای هر گام زمانی، به صورت بلادرنگ تنظیم می‌شوند.
- مقدار اولیه و محدوده تغییر مجاز پارامترها با یک آنالیز حساسیت مقدماتی روی شاخص کلیدی J_1 تعیین شده‌اند، به‌گونه‌ای که همگرایی سریع، پایداری عددی و کاهش نوسانات شدید بهره‌های تطبیقی تضمین شود.

جدول ۲: مقادیر اولیه و بازه مجاز تغییر پارامترهای تطبیقی SAC و ES

Table 2. Initial values and permissible variation ranges of adaptive parameters in SAC and ES

پارامتر	مقدار اولیه	بازه تغییر مجاز
\bar{I}_l	1	[0.1 – 10]
\bar{I}_p	0.5	[0.05 – 5]
$\bar{\sigma}$	0.01	[0.001 – 0.1]
η	0.1	[0.01 – 1]
λ	0.05	[0.001 – 0.5]

¹ Central Difference Approximation

² Base Learning Rate

³ Learning Rate Tuning Coefficient

این بازه‌ها حاصل تحلیل حساسیت مقدماتی بوده و انتخاب آن‌ها به گونه‌ای است که پایداری عددی، سرعت همگرایی و قابلیت بازتولید نتایج در تمامی شبیه‌سازی‌ها تضمین شود. مقادیر اولیه هر پارامتر در داخل این بازه‌ها انتخاب شده و در طول فرآیند کنترل به صورت بلادرنگ و تطبیقی توسط الگوریتم جستجوی اکستریم به‌روزرسانی می‌شوند. با استفاده از همین مقادیر اولیه و بازه‌های ارائه شده در جدول ۲، نتایج عددی این پژوهش به‌طور کامل قابل بازتولید هستند.

مزیت کلیدی استفاده از جستجوی اکستریم در این کنترل‌کننده، عدم نیاز به مدل‌سازی دقیق دینامیک سیستم و قابلیت عملکرد کاملاً بلادرنگ است. برخلاف روش‌های مبتنی بر مدل، الگوریتم پیشنهادی صرفاً بر پایه‌ی مشاهدات خروجی و بدون مداخله‌ی انسانی عمل کرده و قادر به:

- تطبیق سریع در برابر تغییرات پارامترهای سیستم؛
- کاهش نوسانات شدید در بهره‌ها؛
- تضمین پایداری در شرایط نامعین و اغتشاشات پیچیده می‌باشد.

ترکیب تکنیک فراسازگاری با ES به بهبود نرخ همگرایی و جلوگیری از گرفتار شدن در کمینه‌های موضعی کمک می‌کند، چراکه نرخ یادگیری (η) به صورت بلادرنگ بر اساس پاسخ سیستم تنظیم می‌شود. این معماری دو لایه موجب بهبود قابل توجهی در سرعت همگرایی، استحکام سیستم کنترلی و تطبیق‌پذیری آن شده و راه را برای توسعه‌ی سیستم‌های مقاوم، هوشمند و کارآمد در حوزه‌ی کنترل سازه‌های هموار می‌سازد.

نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه‌ی یک کنترل‌کننده بلادرنگ برای بهینه‌سازی ضرایب تطبیقی بدون نیاز به بازمدل‌سازی مکرر و مداخلات انسانی نهفته است؛ که در نتیجه بهبود شناسایی دینامیک‌های متغیر، کاهش حساسیت به شرایط اولیه و تضمین پایداری سیستم فراهم می‌شود.

۵-۲- مقایسه‌ی روش پیشنهادی با کنترل‌کننده‌های مرجع

به‌منظور ارزیابی جامع جایگاه کنترل‌کننده‌ی iRT-SAC نسبت به سایر الگوریتم‌های مرجع فعال و نیمه‌فعال که در بنچمارک سازه‌ی ۲۰ طبقه‌ی اوهتوری به‌کار رفته‌اند، جدول ۳ ویژگی‌های کلیدی آن‌ها را مقایسه می‌کند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی با بهره‌گیری از ساختار دولایه، تابع هزینه‌ی تطبیقی زمان‌وابسته و تنظیم بلادرنگ نرخ یادگیری، ضمن حفظ سادگی محاسباتی و حذف وابستگی به مدل دقیق، پایداری عددی و قابلیت پیاده‌سازی بلادرنگ بالاتری ارائه می‌دهد. این جدول، مرزبندی دقیق نوآوری iRT-SAC را نسبت به سایر روش‌ها روشن می‌کند و پایه‌ای برای تحلیل‌های عددی فصل بعد فراهم می‌سازد. برخلاف روش‌های مرسوم نظیر OSAC و Clipped-LQG که عموماً از نرخ‌های یادگیری ثابت و وزن‌دهی ایستای تابع هزینه استفاده می‌کنند، در چارچوب iRT-SAC توسعه‌یافته در این پژوهش، نرخ‌های تطبیق و ضرایب تابع هزینه به‌صورت هم‌زمان و بلادرنگ توسط لایه ES بازپیکربندی می‌شوند.

جدول ۳: مقایسه ویژگی‌های کنترل‌کننده‌های مرجع و روش پیشنهادی iRT-SAC

Table 3. Comparison of the characteristics of reference controllers and the proposed iRT-SAC method

iRT-SAC (پیشنهادی)	OSAC [۳۳]	Clipped-LQG [۳۲]	Semi-Active H_{∞} [۳۲]	Semi-Active MPC [۳۲]	Fuzzy [۳۱]	LQG [۱۶]	ویژگی
فعال تطبیقی دولایه	فعال	نیمه‌فعال	نیمه‌فعال	نیمه‌فعال	فعال	فعال	نوع کنترل
عملگر فعال ایده‌آل	عملگر فعال ایده‌آل	میراگر MR	میراگر MR	میراگر MR	عملگر فعال ایده‌آل	عملگر فعال ایده‌آل	عملگر مورد استفاده
ندارد	متوسط	زیاد	متوسط	متوسط	ندارد	زیاد	نیاز به مدل دقیق
تطبیقی زمان‌وابسته	ثابت	ثابت	H_{∞} -norm	ثابت	تجربی	ثابت	تابع هزینه

نرخ یادگیری / سازگاری	ثابت	فاقد	ثابت	ثابت	ثابت	ثابت	ثابت
تطبیق در زمان واقعی	ندارد	محدود	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	دارد (تک‌لایه) دارد (دولایه)
نیاز به سنسور حالت	کامل (Full-State)	ورودی-خروجی	محدود	محدود	محدود	ورودی-خروجی	ورودی-خروجی
قابلیت پیاده‌سازی بلادرنگ	خوب	متوسط	خوب	خوب	خوب	خوب	بسیار بالا
نوآوری شاخص	طراحی بهینه ریاضی	منطق زبانی	پیش‌بینی بهینه محدود	مشاهده‌گر اصلاح‌شده Kalman-Bucy	ترکیب LQG و MR	SAC توسعه‌یافته	ساختار دولایه و تابع هزینه تطبیقی

- کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی iRT-SAC با تلفیق ساختار دولایه، مکانیزم فراسازگاری و تابع هزینه‌ی تطبیقی زمان‌وابسته، ضمن حفظ سادگی الگوریتمی، قادر است پایداری عددی و کارایی بلادرنگ بالاتری نسبت به سایر روش‌های مرجع ارائه دهد.
- برخلاف روش‌های مبتنی بر مدل (مانند LQG یا H_∞) و یا روش‌های نیمه‌فعال وابسته به میراگرهای MR، iRT-SAC به صورت مدل-آزاد عمل کرده و تنظیم پارامترهای تطبیقی را به صورت برخط انجام می‌دهد.
- از این‌رو، این کنترل‌کننده می‌تواند به‌عنوان گامی مؤثر در توسعه نسل جدید کنترل‌کننده‌های تطبیقی بلادرنگ برای سازه‌های بلندمرتبه و سیستم‌های غیرخطی محسوب شود و پایه‌ای مستحکم برای بخش نتایج عددی فراهم آورد.

به‌منظور ارزیابی کمی قابلیت اجرای بلادرنگ کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی iRT-SAC، زمان اجرای محاسباتی دو لایه‌ی SAC و جستجوی اکستریم در محیط MATLAB R2023a روی پردازنده‌ی Intel Core i7-11800H اندازه‌گیری شد. این ارزیابی یک برآورد محافظه‌کارانه از بار محاسباتی مورد انتظار در پیاده‌سازی‌های توکار فراهم می‌کند. لایه SAC شامل چند ضرب ماتریس کم‌بعد و یک فیلتر درجه‌یک است. میانگین زمان اجرا طی ۵۰,۰۰۰ چرخه کنترل برابر است با:

$$t_{SAC} = 0.11 \text{ ms}, \quad t_{SAC}^{max} = 0.14 \text{ ms}$$

لایه ES شامل اعمال تحریک سینوسی کوچک، فیلتر پایین‌گذر و سه قانون تطبیق اسکالر است که پیچیدگی محاسباتی آن مستقل از تعداد درجات آزادی سازه می‌باشد. زمان اجرای این لایه برابر است با:

$$t_{ES} = 0.04 \text{ ms}, \quad t_{ES}^{max} = 0.05 \text{ ms}$$

مجموع بیشینه زمان محاسباتی کل حلقه کنترلی برابر است با:

$$t_{total}^{max} = 0.19 \text{ ms} \leq \Delta t = 5 \text{ ms}$$

که نشان می‌دهد کل بار محاسباتی کمتر از ۴٪ بازه نمونه‌برداری را اشغال می‌کند.

از آنجا که در ساختار iRT-SAC هیچ‌گونه عملیات محاسباتی سنگین نظیر وارون‌سازی ماتریس یا حل دستگاه‌های با ابعاد بزرگ وجود ندارد و مرتبه محاسباتی کل الگوریتم ثابت و از نوع $O(1)$ است، بار محاسباتی در هر گام زمانی مستقل از درجه آزادی سازه باقی می‌ماند. نتایج فوق نشان می‌دهد که کنترل‌کننده پیشنهادی با الزامات بلادرنگ کاملاً سازگار بوده و قابلیت پیاده‌سازی مستقیم بر روی کنترلرهای صنعتی مبتنی بر DSP (نظیر TI C2000) و FPGA را داراست. بنابراین، الگوریتم پیشنهادی قادر است در نرخ‌های نمونه‌برداری متعارف حسگرها و عملگرهای سازه‌ای به‌صورت ایمن و پایدار اجرا شود. این نتایج بیانگر آن است که الگوریتم نه‌تنها از نظر تئوریک، بلکه از نظر عملی نیز با محدودیت‌های سخت بلادرنگ در سامانه‌های لرزه‌ای سازگار است.

۳- مطالعه عددی

۳-۱- انتخاب سازه بنچمارک و دلایل آن

در این پژوهش از سازه‌ی ۲۰ طبقه‌ی بنچمارک مجهز به سیستم کابل فعال که نخستین بار توسط اوهتوری^۱ و همکاران (۲۰۰۴) معرفی شده است، استفاده شده است. این مدل به صورت رسمی توسط کمیته‌ی ASCE و انجمن بین‌المللی کنترل سازه‌ها^۲ به عنوان بنچمارک استاندارد بین‌المللی برای ارزیابی الگوریتم‌های کنترل فعال و تطبیقی پیشنهاد شده و مبنای مقایسه‌ی اغلب پژوهش‌های معتبر در این حوزه است. این سازه با هدف بازنمایی رفتار واقع‌گرایانه و غیرخطی یک قاب خمشی فولادی تحت تحریکات لرزه‌ای شدید طراحی شده است. در مدل‌سازی آن، رفتار غیرخطی تیرها و ستون‌ها، کاهش سختی، آسیب‌دیدگی موضعی و اندرکنش‌های دینامیکی اجزا به صورت دقیق لحاظ شده است؛ ویژگی‌هایی که این مدل را به بستری مناسب برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترلی در شرایط واقعی و چالش‌برانگیز تبدیل می‌کند.

در این مطالعه، تحلیل سازه به صورت دوبعدی و در راستای اصلی N-S انجام شده است که مطابق با نسخه رسمی بنچمارک ASCE-IASC بوده و امکان مقایسه مستقیم با مطالعات مرجع را فراهم می‌کند. استفاده و استناد گسترده به این مدل در مطالعات علمی معتبر، نشان‌دهنده اعتبار و کارآمدی آن در بازتولید نتایج، ایجاد شرایط مقایسه‌ی منصفانه و ارائه‌ی معیارهای ارزیابی یکسان برای الگوریتم‌های نوین کنترل لرزه‌ای است [۱۶].

۳-۲- مزایای استفاده از سازه‌ی بنچمارک

استفاده از یک مدل بنچمارک استاندارد در پژوهش‌های حوزه کنترل سازه‌ها، مزایای متعددی به همراه دارد:

۱. اعتبار علمی و استانداردسازی ارزیابی‌ها: بهره‌گیری از مدلی شناخته‌شده و معتبر، موجب تسهیل در مقایسه بین روش‌های مختلف، افزایش اعتبار نتایج و امکان بازتولید آن‌ها توسط سایر پژوهشگران می‌شود.
۲. بازنمایی واقع‌گرایانه‌ی رفتار سازه: مدل ۲۰ طبقه‌ی بنچمارک، با شبیه‌سازی دقیق رفتارهای غیرخطی تحت زلزله، بستری چالش‌برانگیز و واقعی برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده‌ها فراهم می‌سازد.
۳. صرفه‌جویی در منابع پژوهشی: استفاده از مدل آماده، زمان و هزینه‌های مربوط به مدل‌سازی جدید را کاهش داده و تمرکز پژوهشگر را بر توسعه و بهبود الگوریتم‌های کنترلی معطوف می‌سازد.
۴. پشتیبانی از توسعه‌ی روش‌های پیشرفته: فراهم بودن شرایط متنوع و نزدیک به واقعیت، امکان آزمایش و بهینه‌سازی الگوریتم‌های کنترلی را در محیطی سخت‌گیرانه و قابل‌اعتماد مهیا می‌سازد.
۵. طراحی مبتنی بر داده‌های واقعی: ساختار این مدل‌ها معمولاً بر پایه اطلاعات اجرایی و تجربیات میدانی شکل گرفته‌اند که موجب افزایش تطابق نتایج شبیه‌سازی با شرایط عملی سازه‌ها می‌شود.

۳-۳- ضرورت مدل‌سازی عددی در برابر آزمایش واقعی

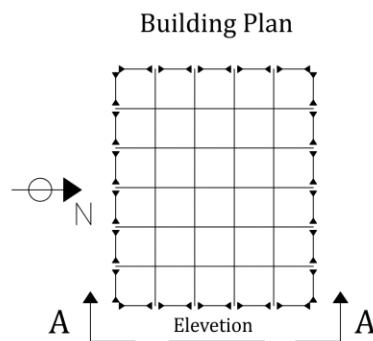
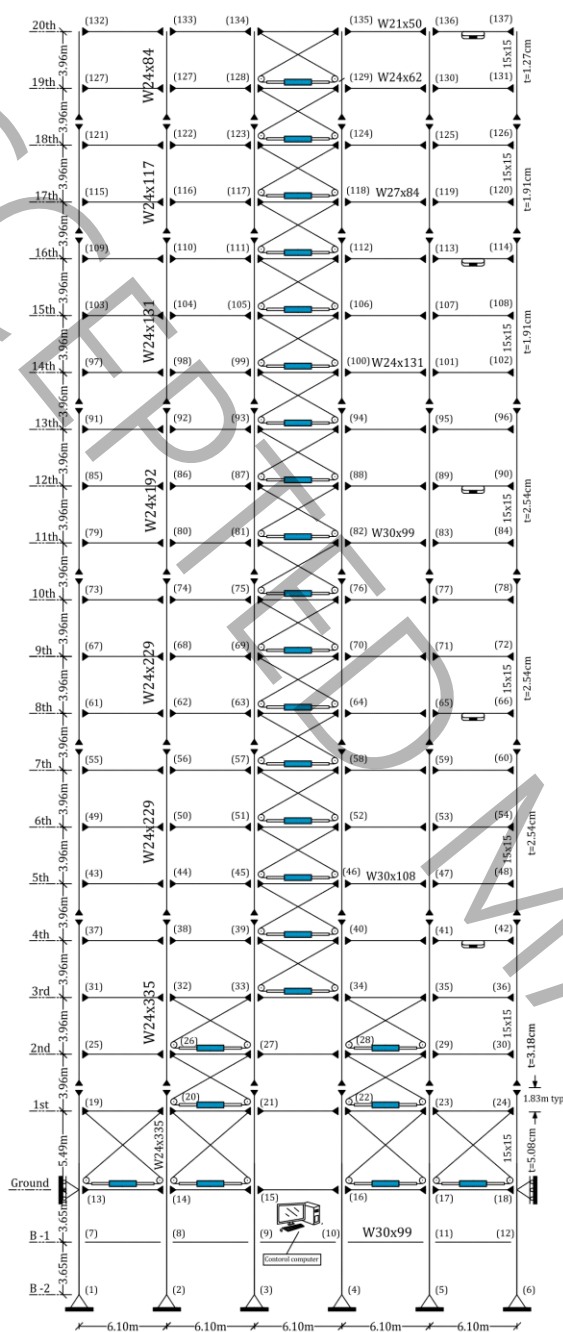
اگرچه آزمایش‌های واقعی بر روی سازه‌های بزرگ مقیاس می‌توانند داده‌های دقیقی از عملکرد سیستم‌های کنترلی ارائه دهند، اما در عمل با چالش‌هایی جدی از جمله هزینه‌های بسیار بالا، پیچیدگی‌های فنی، ملاحظات ایمنی و محدودیت‌های اجرایی مواجه هستند. از این رو، بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی و استفاده از سازه‌های بنچمارک، به عنوان روشی مقرون‌به‌صرفه، ایمن، تکرارپذیر و دارای دقت قابل قبول، رویکردی رایج و معتبر در مراحل تحقیق و توسعه به‌شمار می‌رود. این رویکرد امکان ارزیابی سیستم‌های کنترلی تحت سناریوهای مختلف لرزه‌ای را فراهم ساخته و نقش مؤثری در توسعه‌ی دانش و فناوری کنترل لرزه‌ای ایفا می‌کند.

¹ Ohtori

² International Association for Structural Control; IASC

در دهه‌های گذشته، الگوریتم‌ها و تجهیزات کنترلی متعددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که هر کدام بسته به کاربردهای عملی و اثرات مطلوب، دارای مزایای خاص خود هستند. برای مقایسه‌ی این سیستم‌ها، باید اهداف کاربردی مشخص و مقررات استاندارد مد نظر قرار گیرند. روش ایده‌آل برای ارزیابی این سیستم‌ها، اجرای آزمایش‌های میدانی در مقیاس واقعی است؛ با این حال، به دلیل محدودیت‌های اجرایی و مالی، استفاده از مدل‌های تحلیلی ساختمان‌های بنچمارک، گزینه‌ای مناسب و مؤثر تلقی می‌شود. این مدل‌ها امکان شبیه‌سازی و مقایسه‌ی روش‌های مختلف کنترلی را در شرایط یکسان فراهم می‌سازند.

در این پژوهش، کنترل‌کننده‌ی تطبیقی پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی عددی بر روی مدل غیرخطی ساختمان بنچمارک ۲۰ طبقه ارزیابی شده است (شکل ۲). این مدل که به صورت قاب فولادی با اتصالات گیردار (SMRF) طراحی شده، برای شهر لس‌آنجلس مدل‌سازی شده است. اگرچه این ساختمان در واقعیت ساخته نشده، طراحی آن مطابق با الزامات آیین‌نامه‌های بارهای ثقلی، بادی و لرزه‌ای انجام شده است. سازه دارای پنج دهانه در راستای شمالی-جنوبی و شش دهانه در راستای شرقی-غربی با عرض هر دهانه برابر با ۶/۱۰ متر است. ارتفاع طبقه همکف ۵/۴۹ متر، طبقات فوقانی ۳/۹۶ متر، و دو طبقه زیرزمینی ۳/۶۵ متر در نظر گرفته شده‌اند. مدل‌سازی دینامیکی بر پایه‌ی قاب دوبعدی در راستای شمالی-جنوبی با فرض نیمی از جرم کل به عنوان جرم مؤثر لرزه‌ای انجام شده و نسبت میرایی مودهای اول و پنجم برابر با ۲٪ فرض شده است. مقادیر جرم لرزه‌ای در برخی طبقات به صورت زیر تعریف شده‌اند: طبقه اول $10^5 \times 5/63 \text{ kg}$ ، طبقات دوم تا نوزدهم هر کدام $10^5 \times 5/25 \text{ kg}$ ، طبقه بیستم $10^5 \times 5/84 \text{ kg}$ و طبقات فوقانی $10^7 \times 1/11 \text{ kg}$ می‌باشد. همچنین، مشخصات حسگرها و عملگرهای کنترلی به گونه‌ای تعریف شده‌اند که شتاب‌سنج‌ها دارای حساسیت $9/81 \text{ m/s}^2$ بوده، حداکثر نیروی قابل اعمال توسط هر محرک ۱۰۰۰ کیلو نیوتن است. شتاب‌سنج‌ها به صورت مجزا در طبقات ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ نصب شده‌اند و محرک‌ها به ترتیب شامل چهار عدد در طبقه همکف، دو عدد در هر کدام از طبقات دوم و سوم، و یک عدد در سایر طبقات هستند.



NOTES

Beams (248 MPa):

B-2 _ 4th level	W30x99;
5th _ 10th level	W30x108;
11th _ 16th level	W30x99;
17th _ 18th level	W27x84;
19th level	W24x62;
20th level	W21x50.

Columns (345MPa):

column sizes change at splices
corner columns and interior columns the same, respectively, throughout elevation;
box columns are ASTM A500 (15x15 indicates a 0.38 m (15 in) square box column with wall thickness of t).

Restraints:

columns pinned at base;
structure laterally restrained Ground level.

Splices:

denoted with \updownarrow ;
at 1.83 m (6 ft) w.r.t beam-to-column joint connection:

$\rightarrow \leftarrow$ indicates moment resisting connection.
— indicates a simple (hinged) connection.

Dimensions:

all measurements are center line;
basemen level height 3.65 m (12' - 0");
Ground level height 5.49 m (18' - 0");
1st - 19th level heights 3.96 m (13' - 0");
bay widths (all) 6.10 m (20' - 0").

Seismic Mass:

includes steel framing, for both N-S MRFs;
Ground level 5.32×10^5 kg;
1st level 5.63×10^5 kg;
2nd - 19th level 5.52×10^5 kg;
20th level 5.84×10^5 kg;
entire structure (above ground) 1.11×10^7 kg.

شکل ۲: ساختار ساختمان بنچمارک ۲۰ طبقه

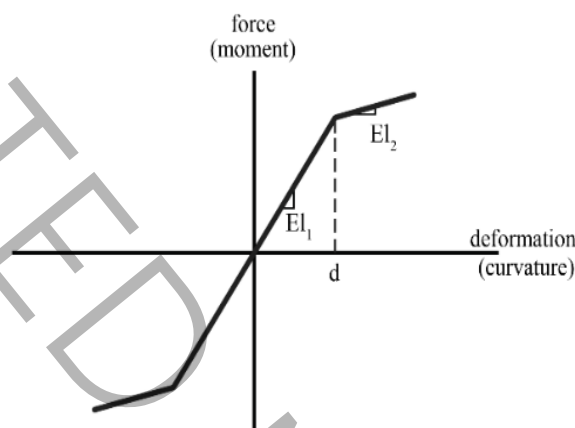
Figure 2. Structural configuration of the 20-story benchmark building

هنگامی که یک سازه تحت حرکات شدید زمین ناشی از زلزله‌های قوی قرار می‌گیرد، اعضای آن ممکن است وارد ناحیه تسلیم شده و رفتار غیرخطی از خود نشان دهند که این امر منجر به پاسخ‌هایی متفاوت از حالت خطی می‌شود. به منظور شبیه‌سازی رفتار تسلیم اعضای سازه و ایجاد مفاصل پلاستیک، از مدل هیستریزس دوطرفی استفاده شده است (شکل ۳)، که در آن اتصالات گیردار در نقاط بحرانی، نظیر محل اتصال ستون‌ها به تیرها، به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که امکان تشکیل مفاصل پلاستیک را فراهم کنند.

مدل اجزای محدود اولیه سازه شامل ۴۱۴ درجه آزادی پیش از اعمال قیود مرکزی است، اما مطابق با ساختار بنچمارک و با هدف کاهش مرتبه سیستم، مدل کاهش‌یافته ۲۰ درجه آزادی به کار گرفته شده است که در آن تغییرمکان افقی هر طبقه به‌عنوان درجه

آزادی مؤثر در نظر گرفته می‌شود. این رویکرد ضمن حفظ دقت دینامیکی، امکان اجرای کارآمد الگوریتم کنترل و مقایسه منصفانه با سایر مطالعات استاندارد را فراهم می‌سازد.

تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه با استفاده از روش انتگرال‌گیری عددی نیومارک- β [۳۴] در محیط MATLAB [۳۵] انجام شد. پارامترهای انتگرال‌گیری مطابق با بنچمارک غیرخطی اوهتوری و همکاران (۲۰۰۴) انتخاب شدند: $\beta = 1/4$ و $\gamma = 1/2$ ، که متناظر با روش میانگین شتاب ثابت^۱ بوده و از نظر عددی پایدار بدون شرط هستند. گام زمانی انتگرال‌گیری برابر با 0.005 s در نظر گرفته شد، که در محدوده پیشنهادی بنچمارک (0.001–0.01s) قرار دارد و با نرخ نمونه‌برداری کنترل‌کننده هماهنگ است. پیاده‌سازی الگوریتم نیومارک- β به صورت تابع S^۲ در MATLAB انجام شد و دقت آن با نتایج نرم‌افزار IDARC2D راستی‌آزمایی گردید. این تنظیمات اطمینان می‌دهند که تحلیل عددی پایدار و معتبر بوده و با شرایط مرجع تطابق دارد.



شکل ۳: مدل هیستریزس دوخطی برای خمش اعضای سازه‌ای

Figure 3. Bilinear hysteresis model for flexural behavior of structural members

مدل شبیه‌سازی شده با هدف ارزیابی رفتار دینامیکی سازه تحت سناریوهای مختلف زلزله‌ای طراحی شده است و محیط SIMULINK به عنوان بستر اصلی شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. در این محیط، بلوک‌های ورودی (مانند حسگرها) و خروجی (مانند عملگرهای کنترلی) تعریف شده‌اند تا عملکرد سیستم کنترلی در شرایط لرزه‌ای مختلف به طور جامع ارزیابی شود. شاخص‌های عملکردی J_1 تا J_{17} مطابق تعریف رسمی بنچمارک غیرخطی اوهتوری و همکاران (۲۰۰۴) محاسبه شده‌اند. واحد هر کمیت فیزیکی شامل دریافت نسبی بدون بعد، شتاب بر حسب m/s^2 ، نیروی برشی پایه بر حسب MN ، انرژی اتلافی بر حسب $N \cdot m$ ، توان کنترلی بر حسب W و تغییر مکان عملگر بر حسب m مطابق با داده‌های پاسخ کنترل نشده سازه در مقاله اوهتوری و همکارانش تعیین شده است.

برای شاخص‌های عملکردی سازه ($J_{14}-J_1$) نرمال‌سازی به صورت نسبت مقدار کنترل شده به مقدار بدون کنترل انجام شده است، به گونه‌ای که مقادیر مرجع از پاسخ سازه بدون کنترل استخراج شده‌اند. شاخص‌های سخت‌افزاری ($J_{17}-J_{15}$) بدون نرمال‌سازی و به صورت مقادیر مطلق گزارش می‌شوند. بنابراین، تمامی مقادیر نرمال شده در جدول ۴ بدون بعد بوده مقدار کمتر از ۱ نشان‌دهنده عملکرد بهتر کنترل‌کننده است، و مقادیر غیرنرمال شده دارای واحدهای فیزیکی مشخص و مطابق مرجع بنچمارک هستند. همچنین، مطابق با ساختار رسمی بنچمارک اوهتوری و همکاران (۲۰۰۴)، شاخص‌های J_1 تا J_{17} در چهار گروه اصلی شامل: (الف) پاسخ سازه، (ب) آسیب سازه، (ج) عملکرد دستگاه‌های کنترلی و (د) الزامات استراتژی کنترلی طبقه‌بندی می‌شوند.

¹ Constant Average Acceleration Method

² S-Function

جدول ۴: شاخص‌های ارزیابی برای ساختمان بنچمارک ۲۰ طبقه

Table 4. Evaluation indices for the 20-story benchmark building

<p>“The Peak Interstory Drift Ratio”</p> $J_1 = \text{Max}_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left\{ \frac{ d_i(t) }{h_i} \right\}}{\delta^{\max}} \right\}$	<p>“The Level Acceleration”</p> $J_2 = \text{Max}_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left\{ \ddot{x}_{ai}(t) \right\}}{\ddot{x}_a^{\max}} \right\}$	<p>“The Base Shear”</p> $J_3 = \text{Max}_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_t \left\{ \left \sum_i m_i \ddot{x}_{ai}(t) \right \right\}}{F_b^{\max}} \right\}$
<p>“The Normed Interstory Drift Ratio”</p> $J_4 = \text{Max}_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_i \left\{ \frac{\ d_i(t)\ }{h_i} \right\}}{\ \delta^{\max}\ } \right\}$	<p>“The Normed Level Acceleration”</p> $J_5 = \text{Max}_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_i \left\{ \ \ddot{x}_{ai}(t)\ \right\}}{\ \ddot{x}_b^{\max}\ } \right\}$	<p>“The Normed Base Shear”</p> $J_6 = \text{Max}_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\left\ \sum_i m_i \ddot{x}_{ai}(t) \right\ }{\ F_b^{\max}\ } \right\}$
<p>“The Ductility Factor”</p> $J_7 = \text{Max}_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_{t,j} \left\{ \frac{ \phi_j(t) }{\phi_{yj}} \right\}}{\phi^{\max}} \right\}$	<p>“Dissipated Energy”</p> $J_8 = \text{Max}_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_{t,j} \left\{ \frac{\int dE_j}{F_{yj} \cdot \phi_{yj}} \right\}}{E^{\max}} \right\}$	<p>“Plastic Connections”</p> $J_9 = \text{Max}_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{N_d^C}{N_d} \right\}$
<p>“The Normed Ductility Factor”</p> $J_{10} = \text{Max}_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_j \left\{ \frac{\ \phi_j(t)\ }{\phi_{yj}} \right\}}{\ \phi^{\max}\ } \right\}$	<p>“The Control Force”</p> $J_{11} = \text{Max}_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_{t,l} \left\{ f_l(t) \right\}}{W} \right\}$	<p>“The Control Device Stroke”</p> $J_{12} = \text{Max}_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left\{ y_i^a(t) \right\}}{x^{\max}} \right\}$
<p>“The Control Power”</p> $J_{13} = \text{Max}_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_t \left\{ \sum_l p_l(t) \right\}}{\dot{x}^{\max} W} \right\}$	<p>“The Normed Control Power”</p> $J_{14} = \text{Max}_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\sum_l \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} p_l(t) dt}{\dot{x}^{\max} W} \right\}$	<p>“The Control Devices”</p> $J_{15} = \text{Number of control devices}$
		<p>“Sensors”</p> $J_{16} = \text{Number of required sensors}$
		<p>“Computational Resources”</p> $J_{17} = \text{dim}(X_k^c)$

همچنین، به منظور محاسبه‌ی $\|\cdot\|$ مربوط به هر شاخص، از رابطه‌ی (۲۱) استفاده شده است که در آن t_f بیانگر مدت زمان تحلیل است. برای رکوردهای زلزله‌ی ال سنترو، هاجینوهه و نورتریج، مدت زمان تحلیل ۱۰۰ ثانیه، و برای رکورد زلزله کوبه، ۱۸۰ ثانیه در نظر گرفته شده است:

$$\|\cdot\| = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} (\cdot)^2 dt} \quad (21)$$

در این پژوهش، چهار رکورد زلزله‌ی تاریخی شامل ال سنتر^۱ (۱۹۴۰)، هاجینوهه^۲ (۱۹۶۸)، نورتریج^۳ (۱۹۹۴) و کوبه^۴ (۱۹۹۵) به‌منظور پوشش‌دهی طیف گسترده‌ای از سناریوهای لرزه‌ای انتخاب شده‌اند.

این رکوردها به منظور پوشش تنوع تکتونیکی، تفاوت در مکانیزم‌های گسلش و اهمیت تاریخی آن‌ها در مطالعات زلزله‌شناسی، مطابق با پروتکل رسمی بنچمارک اوهتوری و همکاران (۲۰۰۴) انتخاب شده‌اند و به‌عنوان ورودی استاندارد در اغلب پژوهش‌های مرجع کنترل فعال و تطبیقی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این رکوردها طیفی از ویژگی‌های دینامیکی زمین‌لرزه‌های مخرب، شامل حرکات نزدیک‌گسل و دور از گسل، را پوشش می‌دهند و برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده‌ها در سناریوهای لرزه‌ای متنوع بسیار مناسب هستند. ویژگی‌های متمایز هر رکورد به‌ترتیب عبارت‌اند از: ال سنتر با دوره تناوب‌های بلند و شتاب اوج $0.35g$ ، هاجینوهه با محتوای فرکانسی پایین و شتاب اوج $0.23g$ ، نورتریج با پالس‌های شدید سرعت و شتاب اوج $0.84g$ ، و کوبه با اثرات قوی جهت‌داری مستقیم و شتاب اوج $0.83g$. این ویژگی‌ها امکان ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترلی را در شرایط متنوع و واقع‌گرایانه‌ی تحریک لرزه‌ای فراهم می‌سازند.

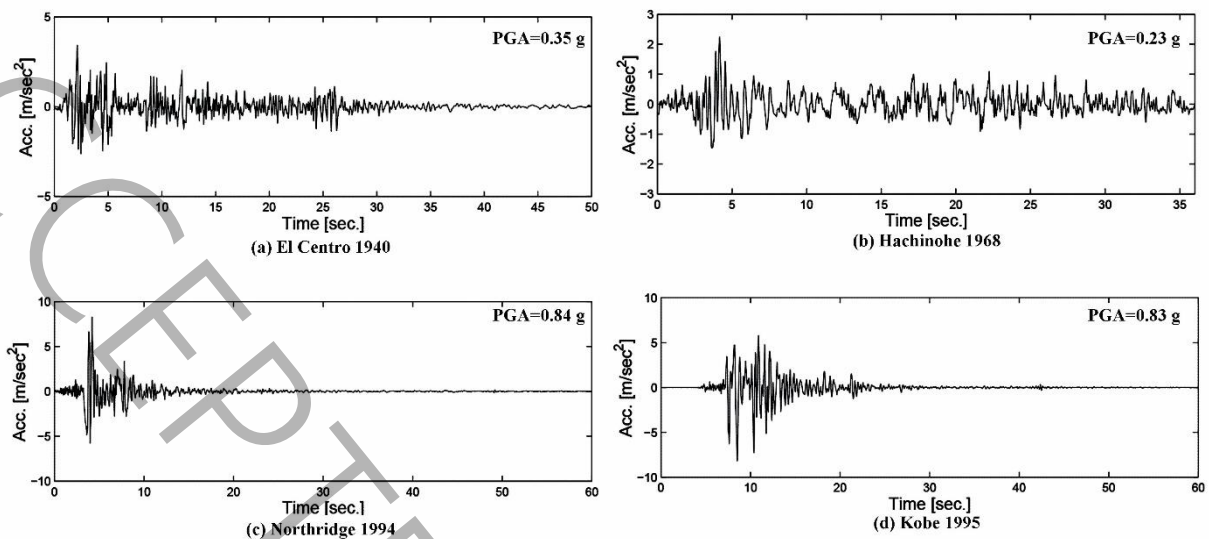
برای افزایش دقت شبیه‌سازی و انطباق بهتر با شرایط واقعی، تمامی عدم‌قطعیت‌های پارامتریک و لرزه‌ای — از جمله تغییرات سختی اعضای سازه و اعمال ضرایب مقیاس‌گذاری مختلف بر رکوردهای زلزله — در تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی لحاظ شده‌اند. رکوردهای منتخب به‌دلیل دقت بالای ثبت، مستندسازی علمی معتبر، و تنوع در بزرگا، عمق کانونی و طیف فرکانسی، بستری مناسب برای تحلیل‌های عددی فراهم کرده و امکان مقایسه‌پذیری نتایج با مطالعات بین‌المللی را به‌صورت قابل اتکا مهیا می‌سازند. به‌منظور تحلیل عملکرد کنترل‌کننده در سطوح مختلف شدت لرزه‌ای، رکوردهای زلزله ال سنتر و هاجینوهه در سه سطح مقیاس شده با ضرایب 0.5 ، 1.0 و 1.5 و رکوردهای زلزله نورتریج و کوبه در دو سطح 0.5 ، 1.0 نسبت به شدت اوج هر رکورد مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این ضرایب، طیفی از انرژی ورودی را بازنمایی می‌کنند و امکان بررسی رفتار غیرخطی سازه، تغییر دوره‌های طبیعی، شکل پاسخ دینامیکی و همچنین پایداری و کارایی کنترل‌کننده در شرایط مختلف لرزه‌ای را فراهم می‌آورند. این چارچوب تحلیلی امکان شبیه‌سازی هم‌زمان رفتار غیرخطی سازه و عملکرد کنترل‌کننده را تحت سطوح مختلف شدت لرزه‌ای فراهم می‌سازد. شاخص‌های ارزیابی به‌صورت یکنواخت و مطابق با تعریف رسمی بنچمارک، شامل معیارهای پاسخ لرزه‌ای، آسیب سازه‌ای و عملکرد تجهیزات کنترلی، تعریف شده‌اند تا مبنای یکسانی برای مقایسه‌ی سناریوهای مختلف تحلیل فراهم شود.

¹ El Centro

² Hachinohe

³ Northridge

⁴ Kobe



شکل ۴: مقدار PGA با توجه به تاریخچه زمانی در میدان دور و نزدیک گسل
Figure 4. PGA values corresponding to time histories in near-field and far-field records

۳-۶- بسامد و دامنه تحریک ES

در لایه‌ی تطبیق مبتنی بر جستجوی اکستریم، فرکانس تحریک سینوسی به‌گونه‌ای انتخاب شده است که به‌طور کامل خارج از باند فرکانسی سازه ($0.26-3.68$ Hz) قرار گیرد و هیچ‌گونه اندرکنش یا تداخل با پاسخ دینامیکی ایجاد نکند. فرکانس تزریق ES برابر با 8 Hz انتخاب شد که به‌طور قابل‌توجهی بزرگتر از حداکثر فرکانس حالت‌های سازه (3.68 Hz) بوده و بر اساس معیار استاندارد اصل جداسازی مقیاس‌های فرکانسی^۱ در روش ES، از ورود مؤلفه‌های قابل مشاهده به پاسخ دینامیکی سازه جلوگیری می‌کند. دامنه‌ی تحریک نیز کمتر از $1/10\%$ مقدار نامی ضرایب کنترلی تعیین شده است تا حضور این سیگنال در نیروهای کنترلی و طیف پاسخ کاملاً ناچیز باشد. این ساختار که شامل یک تحریک کم‌دامنه، تخمین‌گر گرادیان و یک فیلتر پایین‌گذر است، از نظر محاسباتی دارای مرتبه‌ی ثابت $O(1)$ بوده و هیچ بار اضافی بر نرخ نمونه‌برداری 0.005 s تحمیل نمی‌کند. سیگنال تحریک ES مطابق با تنظیمات بیان‌شده در این بخش در فرآیند شبیه‌سازی لحاظ شده است.

۳-۷- پیچیدگی محاسباتی و امکان‌پذیری بلادرنگ

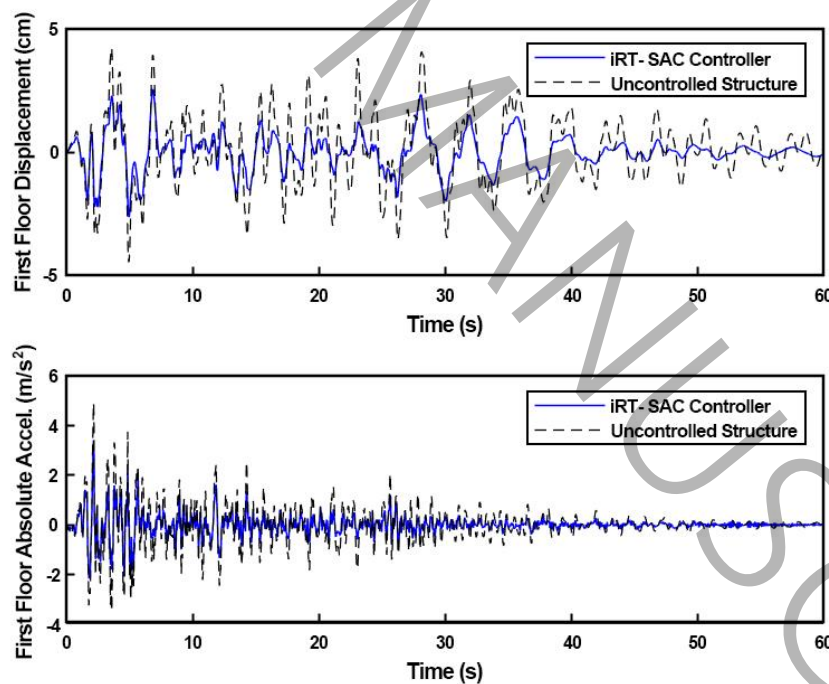
در کنار عملکرد لرزه‌ای، امکان‌پذیری محاسباتی و اجرای بلادرنگ کنترل‌کننده نیز حائز اهمیت است. از آنجا که کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی با هدف کاربردهای بلادرنگ طراحی شده است، در این بخش ملاحظات مربوط به پیچیدگی محاسباتی و امکان اجرای بلادرنگ الگوریتم مورد بررسی قرار می‌گیرد. الگوریتم iRT-SAC در محیط MATLAB/SIMULINK به‌صورت گسسته پیاده‌سازی شده است. در هر گام زمانی، محاسبات کنترل‌کننده شامل ضرب‌های ماتریسی ساده و به‌روزرسانی مستقیم ضرایب تطبیقی بوده و نیاز به حل مسائل بهینه‌سازی یا معادلات جبری پرهزینه ندارد. زمان محاسباتی هر گام کنترلی بر روی پردازنده Core i7 (3.2 GHz) به‌طور متوسط کمتر از 0.5 ms اندازه‌گیری شد، در حالی که دوره نمونه‌برداری سیستم $\Delta t = 5$ ms در نظر گرفته شده است. این اختلاف زمانی قابل‌توجه نشان می‌دهد که الگوریتم با حاشیه ایمن بیش از ده برابر سریع‌تر از زمان واقعی اجرا می‌شود؛ از این رو، چارچوب پیشنهادی از نظر محاسباتی کاملاً مناسب پیاده‌سازی بلادرنگ بوده و قابلیت اجرا بر روی سخت‌افزارهای کنترلی بلادرنگ نظیر DSP یا FPGA را داراست.

¹ Separation Principle

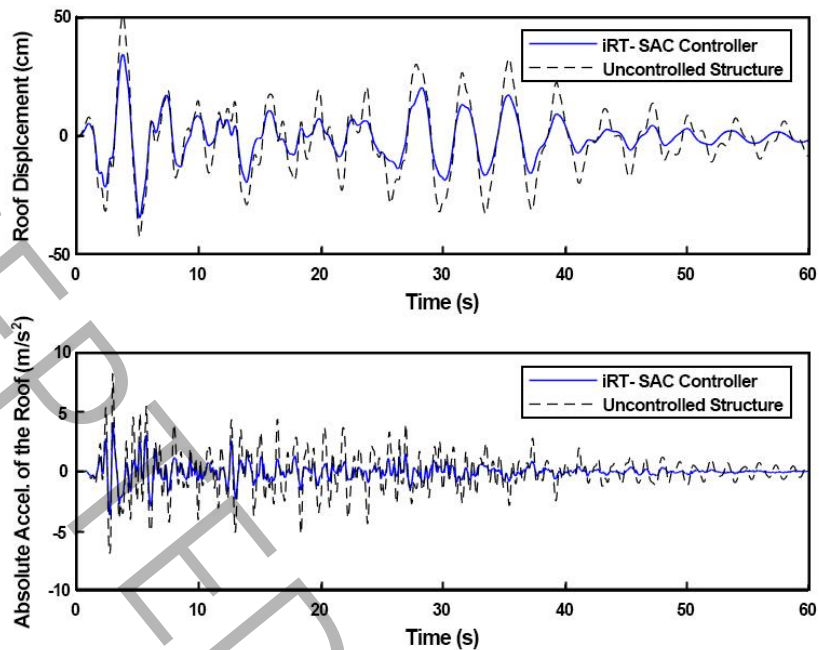
۴- بحث و تحلیل نتایج

در این بخش، عملکرد کنترل‌کننده‌ی تطبیقی iRT-SAC برای یک سازه‌ی غیرخطی ۲۰ طبقه مجهز به سیستم کنترل فعال کابلی، از طریق شبیه‌سازی‌های عددی در محیط MATLAB مورد ارزیابی قرار گرفته است. طراحی این کنترل‌کننده مبتنی بر ساختار ساده‌ی SAC و بهره‌گیری از سازوکارهای تنظیم خودکار بهره‌ها، شامل تکنیک جستجوی اکستریم و فرآیند فراسازگاری، صورت گرفته است. این طراحی به‌گونه‌ای انجام شده که کنترل‌کننده، بدون نیاز به مدل‌سازی دقیق سیستم و صرفاً با تکیه بر بازخورد خروجی و اطلاعات مرجع، توانایی ارائه‌ی پاسخ کنترلی پایدار در شرایط غیرخطی، پیچیده، و همراه با عدم قطعیت‌های پارامتریک و تحریکات لرزه‌ای متغیر را داشته باشد.

به‌منظور ارزیابی جامع عملکرد، کنترل‌کننده‌ی iRT-SAC با چندین روش کنترلی پیشرفته، از جمله کنترل‌کننده‌ی LQG [۱۶]، کنترل فازی [۳۱]، کنترل Clipped-LQG [۳۲]، کنترل نیمه‌فعال مبتنی بر MPC [۳۲]، کنترل نیمه‌فعال H_∞ [۳۲] و کنترل‌کننده‌ی OSAC [۳۳]، مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی در اغلب شاخص‌های عملکرد، به‌ویژه تحت تحریکات لرزه‌ای شدید، عملکرد برتری نسبت به سایر روش‌ها ارائه کرده است. همچنین، به‌منظور ارزیابی دقت و پایداری عملکرد کنترل‌کننده در سطوح مختلف شدت زلزله، سناریوهایی با سطوح مقیاس‌گذاری شده از شتاب اوج زمین (PGA) طراحی و اجرا شده‌اند. در این سناریوها، رکوردهای زلزله‌ی ال‌سنترو و هاجینوهه با ضرایب مقیاس ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ نسبت به شتاب اوج هر رکورد و رکوردهای زلزله نورتریج و کوبه با ضرایب مقیاس ۰/۵ و ۱/۰ نسبت به شتاب اوج اصلی آن‌ها در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مقیاس‌گذاری به‌منظور پوشش طیف گسترده‌ای از شدت‌های لرزه‌ای و بررسی دقیق رفتار غیرخطی سازه انجام شده است.



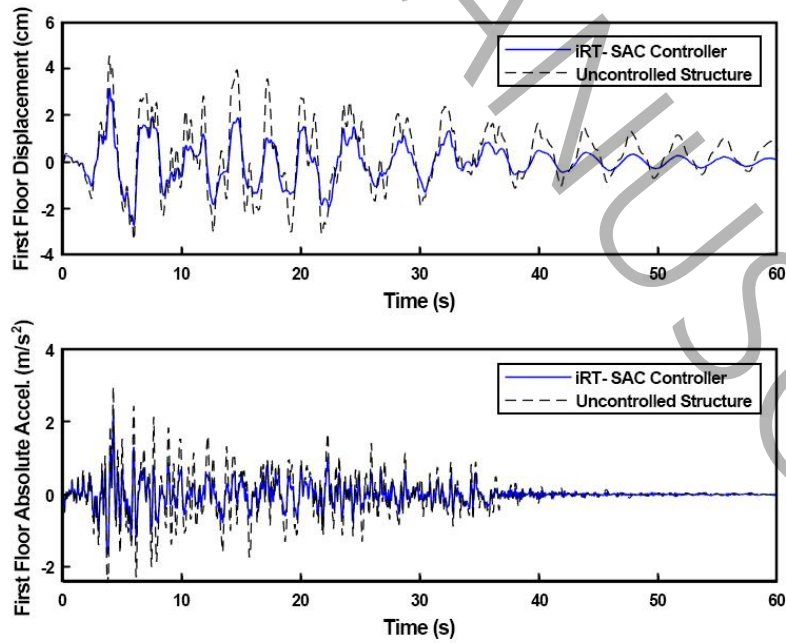
(الف)



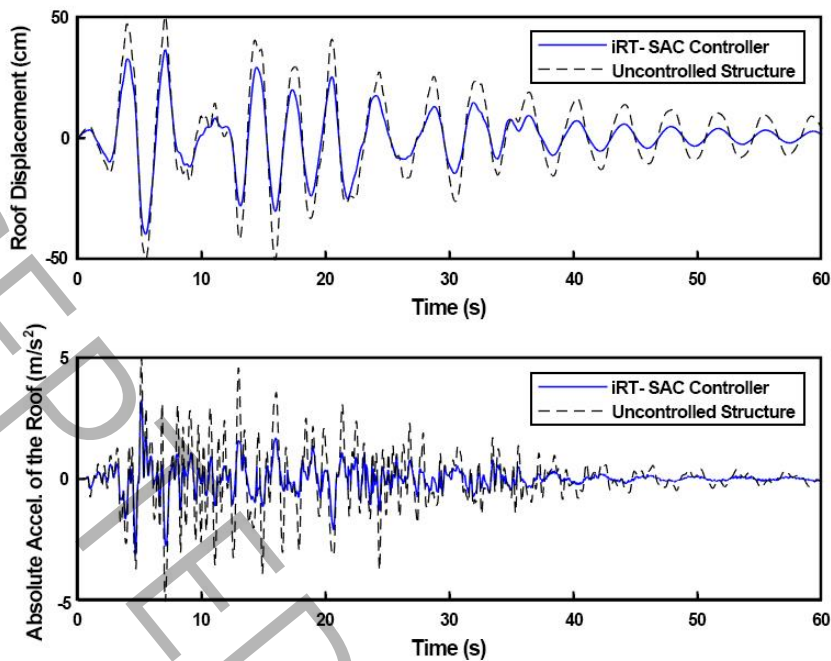
(ب)

شکل ۵: تاریخچه‌ی زمانی جابجایی و شتاب مطلق در (الف) طبقه‌ی اول و (ب) طبقه‌ی بیستم، تحت رکورد زمین‌لرزه ال سنترو با ضریب مقیاس ۱/۵ نسبت به رکورد ثبت شده

Figure 5. Time histories of displacement and absolute acceleration at (a) the first story and (b) the twentieth story under the El Centro earthquake record scaled by a factor of 1.5 relative to the original record



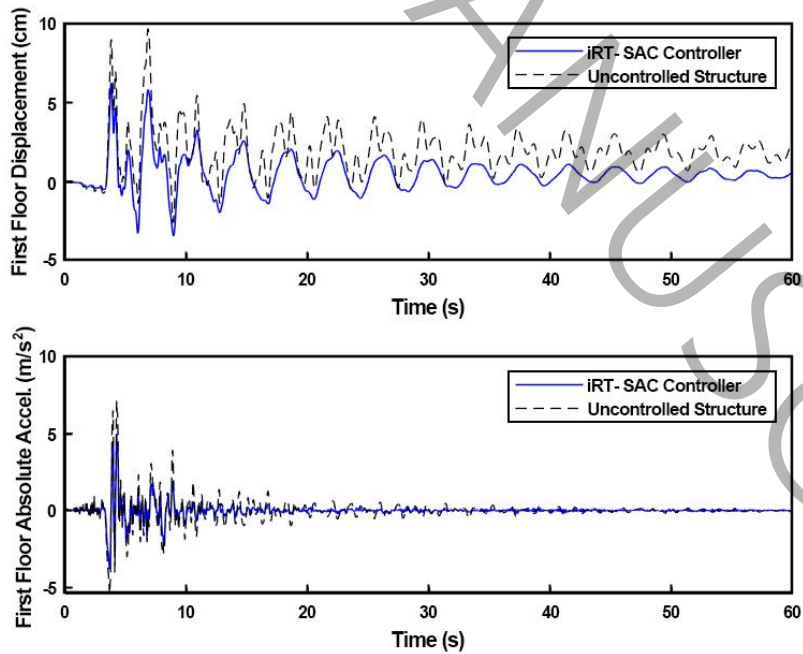
(الف)



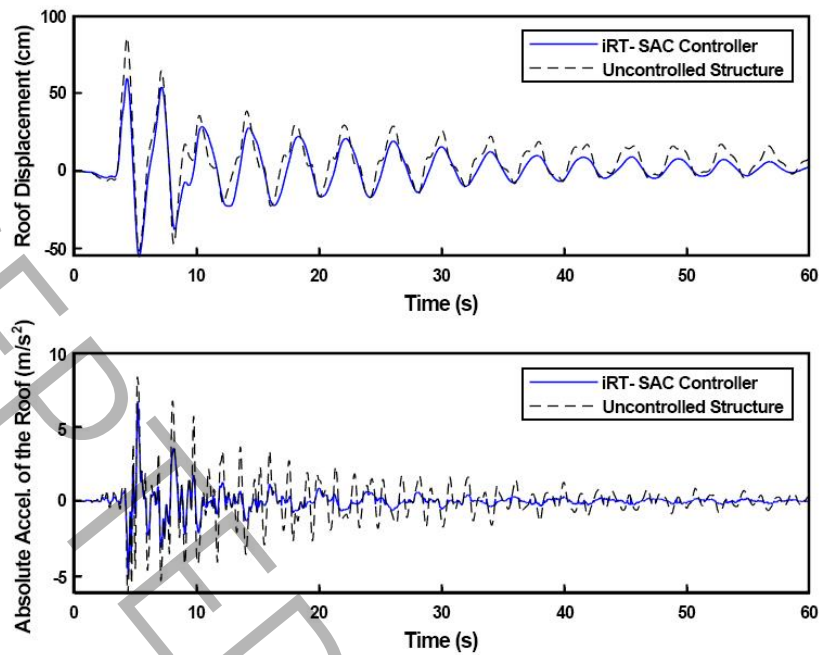
(ب)

شکل ۶: تاریخچه‌ی زمانی جابجایی و شتاب مطلق در (الف) طبقه‌ی اول و (ب) طبقه‌ی بیستم، تحت رکورد زمین‌لرزه هاجینوهه با ضریب مقیاس ۱/۵ نسبت به رکورد ثبت شده

Figure 6. Time histories of displacement and absolute acceleration at (a) the first story and (b) the twentieth story under the Hachinohe earthquake record scaled by a factor of 1.5 relative to the original record



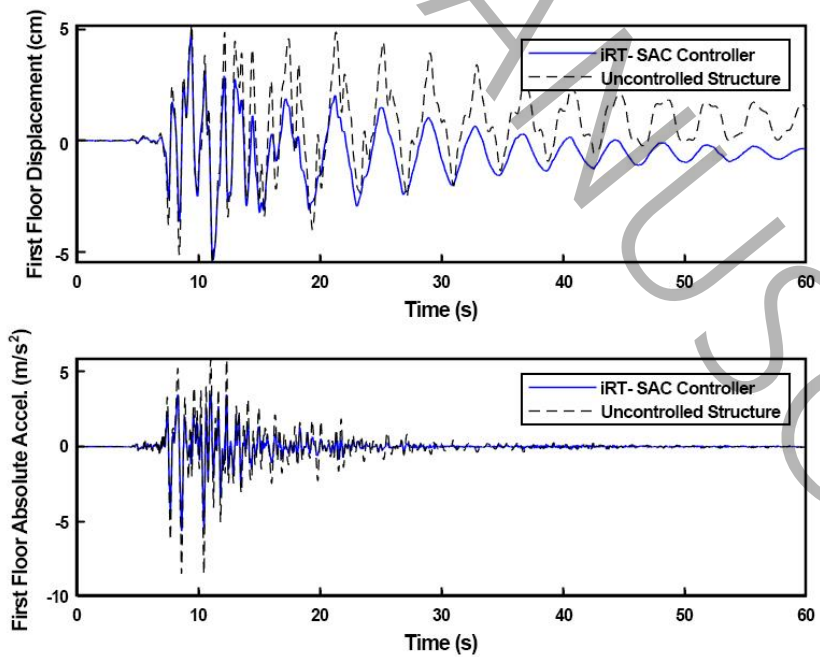
(الف)



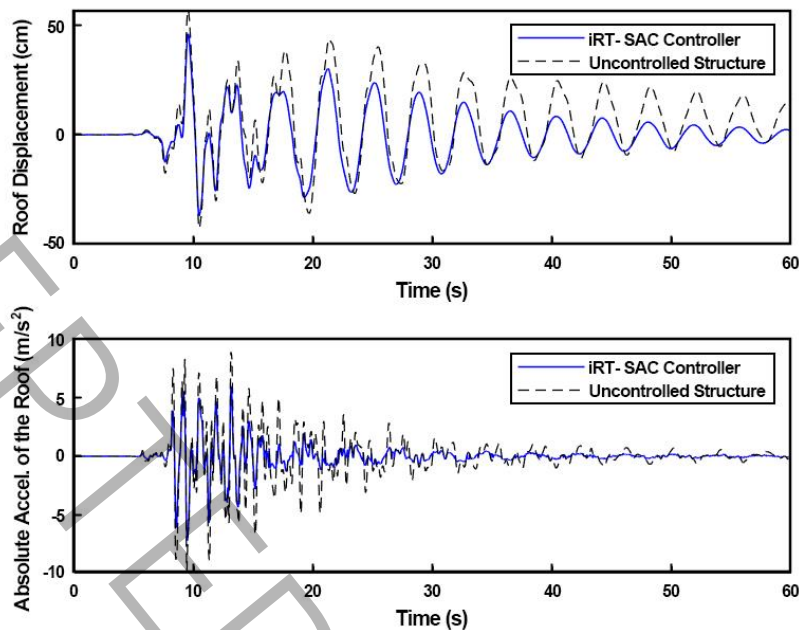
(ب)

شکل ۷: تاریخچه‌ی زمانی جابجایی و شتاب مطلق در (الف) طبقه‌ی اول و (ب) طبقه‌ی بیستم، تحت رکورد زمین‌لرزه نورتریج با شدت ثبت‌شده.

Figure 7. Time histories of displacement and absolute acceleration at (a) the first story and (b) the twentieth story under the Northridge earthquake record with the recorded intensity



(الف)



(ب)

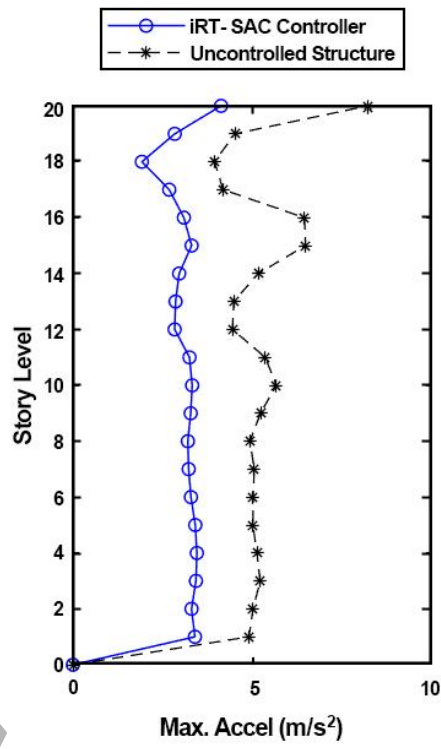
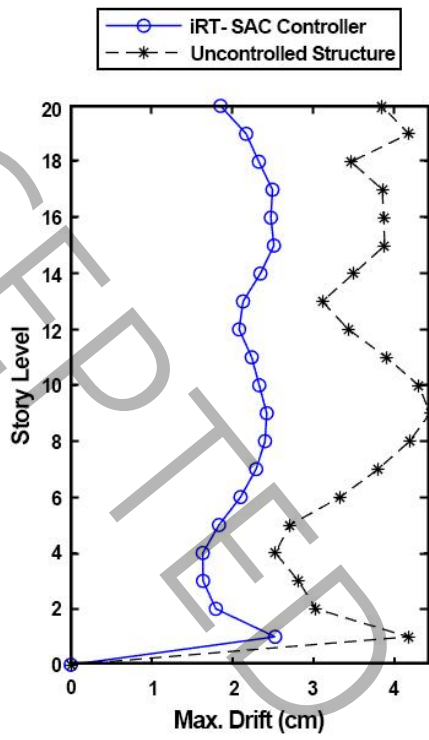
شکل ۸: تاریخچه‌ی زمانی جابجایی و شتاب مطلق در (الف) طبقه‌ی اول و (ب) طبقه‌ی بیستم، تحت رکورد زمین‌لرزه کوبه با شدت ثبت‌شده

Figure 8. Time histories of displacement and absolute acceleration at (a) the first story and (b) the twentieth story under the Kobe earthquake record with the recorded intensity

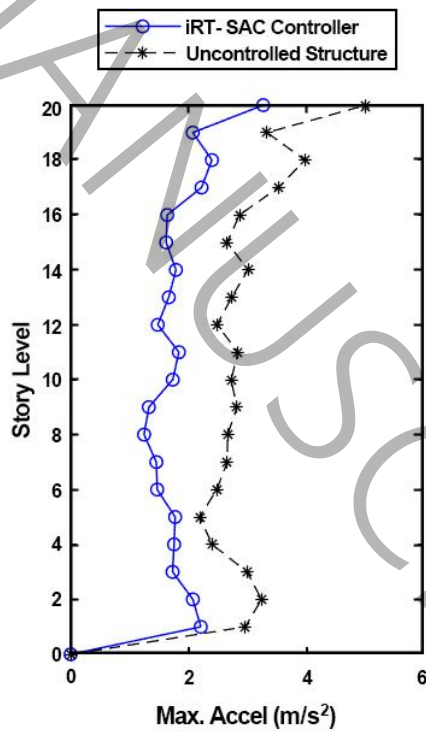
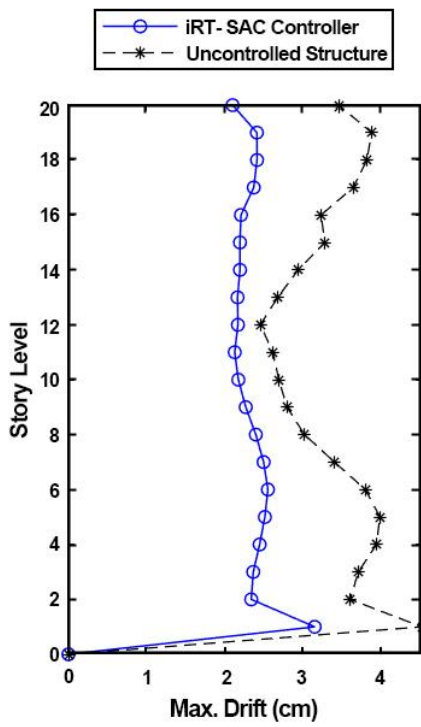
شکل‌های ۵ تا ۸ به‌وضوح نشان می‌دهند که به‌کارگیری سیستم کنترل فعال کابلی همراه با کنترل‌کننده‌ی تطبیقی iRT-SAC منجر به کاهش قابل‌توجه در جابه‌جایی‌های دائمی، به‌ویژه در طبقه‌ی اول سازه شده است. این کاهش در تغییرمکان‌ها از تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای سازه‌ای جلوگیری کرده و در محدودسازی تغییرشکل‌های غیرقابل بازگشت نقش مؤثری ایفا کرده است. در نتیجه، دوام و تاب‌آوری سازه در برابر تحریکات شدید لرزه‌ای به‌طور چشمگیری ارتقا یافته است.

مقایسه‌ی پاسخ‌های سازه در دو حالت کنترل‌نشده و کنترل‌شده با iRT-SAC نشان می‌دهد که این کنترل‌کننده توانسته است جابه‌جایی‌ها و شتاب‌های مطلق سازه‌ای را به‌طور محسوسی کاهش دهد. این بهبود عملکرد، به‌ویژه در مواجهه با زلزله‌های شدید، نشان‌دهنده‌ی اثربخشی کنترل‌کننده در شرایط غیرخطی و همراه با عدم‌قطعیت‌های لرزه‌ای است. شایان ذکر است که تحلیل دقیق‌تر و مقایسه‌ی کمی عملکرد iRT-SAC نسبت به سایر روش‌های کنترلی پیشرفته، در ادامه و در قالب جداول مربوطه ارائه خواهد شد. همچنین، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که با افزایش شدت زلزله، احتمال تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای سازه‌ای افزایش می‌یابد؛ با این حال، به‌کارگیری کنترل‌کننده‌ی iRT-SAC موجب مهار مؤثر تغییرمکان‌ها و شتاب‌ها شده و از بروز این پدیده جلوگیری کرده است، که نشان از کارایی آن در شرایط بارگذاری شدید و غیرخطی دارد.

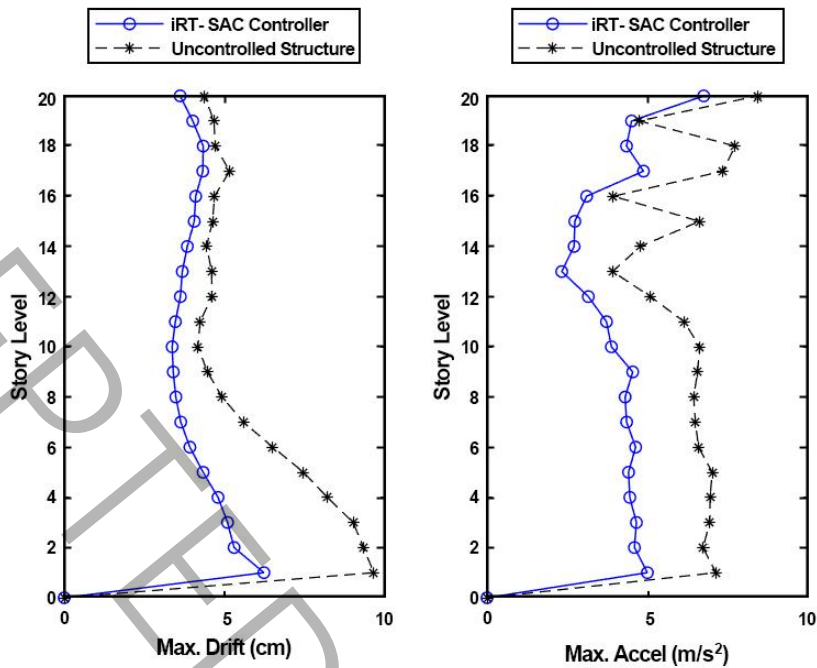
در ادامه، شکل‌های ۹ (الف) تا ۹ (ت) بیشینه‌ی دریافت و بیشینه‌ی شتاب مطلق سازه را در دو حالت کنترل‌نشده و کنترل‌شده با استفاده از iRT-SAC نمایش می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این کنترل‌کننده توانسته است پاسخ‌های دینامیکی سازه، به‌ویژه در طبقات پایین و بالا، را به‌طور مؤثری کاهش داده و عملکرد پایداری در برابر تحریکات لرزه‌ای فراهم آورد. این نتایج، شواهد روشنی از توانمندی کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی در شرایط غیرخطی و نامعین لرزه‌ای فراهم می‌کنند.



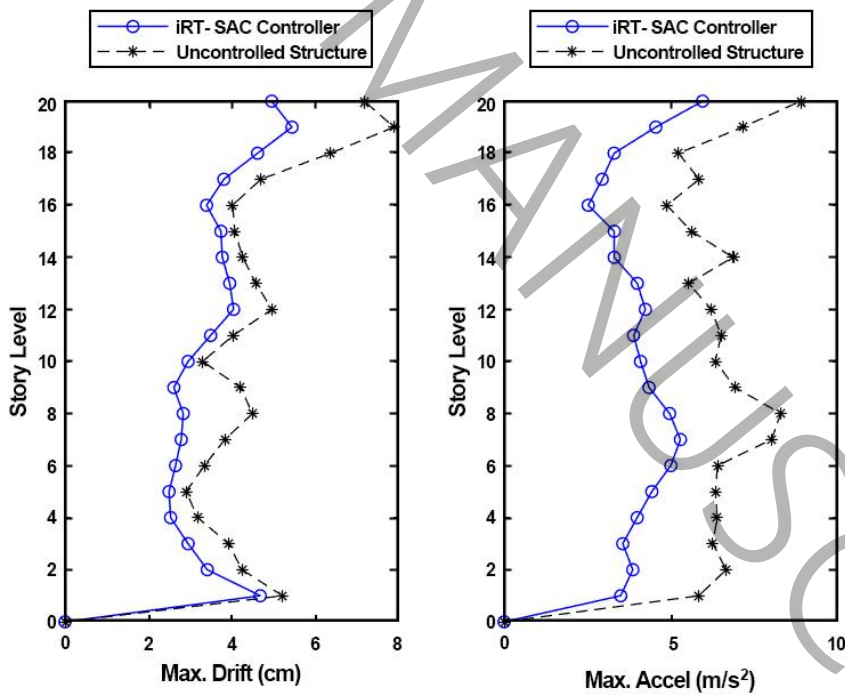
(الف) ال سسترو



(ب) هاچينووه



(پ) نورتریج

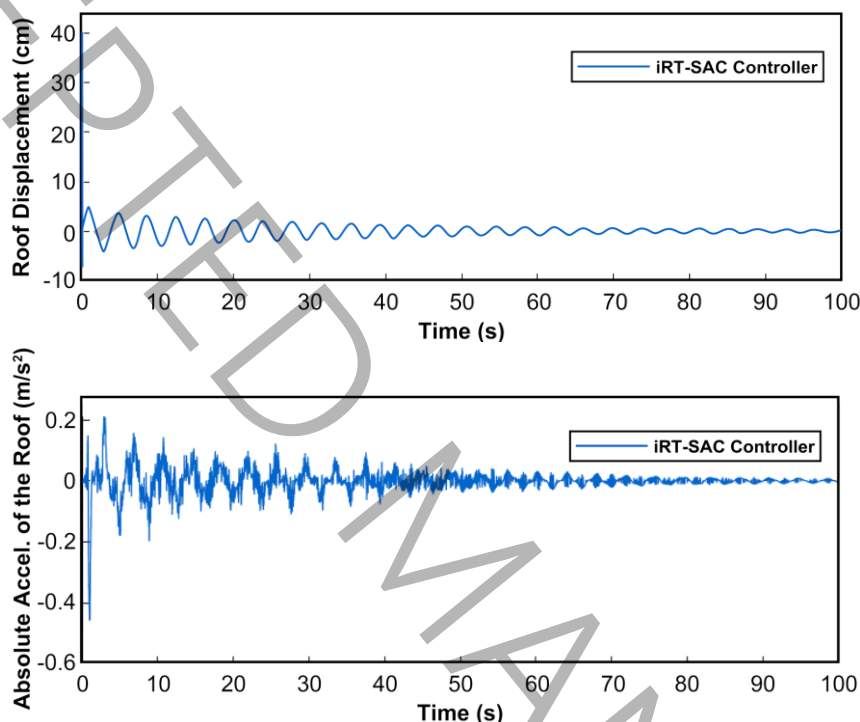


(ت) کوبه

شکل ۹: بیشینه‌ی دریفت و شتاب مطلق سازه در دو حالت کنترل نشده و کنترل شده با کنترل کننده‌ی iRT-SAC، بر اساس چهار رکورد زمین لرزه شامل: ال سنتر و هاچینوهه با ضریب مقیاس ۱/۵ نسبت به رکورد ثبت شده، و کوبه و نورتریج با ضریب مقیاس ۱/۰ (شدت ثبت شده رکورد)

Figure 9. Maximum structural drift and absolute acceleration in uncontrolled and iRT-SAC controlled cases based on four earthquake records: El Centro and Hachinohe scaled by a factor of 1.5 relative to the original records, and Kobe and Northridge scaled by 1.0 (recorded intensity)

برای بررسی پایداری عددی کنترل‌کننده‌ی تطبیقی iRT-SAC، از رویکرد تحلیلی و عددی مشابه مطالعه‌ی الداود و همکاران (۲۰۰۴) [۳۱] استفاده شد. از آنجا که کنترل‌کننده‌های تطبیقی معمولاً فاقد مدل صریح برای ارائه‌ی اثبات تحلیلی پایداری هستند، رفتار گذرای سیستم کنترل‌شده تحت ارتعاش آزاد ناشی از اعمال یک تغییرمکان اولیه ۴۰ سانتی‌متری در طبقه‌ی آخر سازه به‌عنوان شاخص پایداری عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پاسخ‌های سازه پس از تحریک اولیه به‌صورت پایدار به صفر همگرا شده و هیچ‌گونه واگرایی یا نوسان پایدار مشاهده نشد. بنابراین، پایداری عددی کنترل‌کننده‌ی iRT-SAC مطابق با معیارهای پیشنهادی در منابع پیشین [۳۱، ۳۶] تأیید می‌شود.



شکل ۱۰: ارزیابی پایداری عددی کنترل‌کننده iRT-SAC بر اساس پاسخ‌های ارتعاش آزاد سازه پس از تحریک اولیه

Figure 10. Numerical stability evaluation of the iRT-SAC controller based on the free vibration responses of the structure after initial excitation

برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی iRT-SAC و مقایسه‌ی منصفانه با روش‌های مرجع، لازم است اشاره شود که داده‌های کنترل‌کننده‌های مرجع بر اساس پارامترهای گزارش‌شده در مقالات اصلی و تحت شرایط فیزیکی و محیطی یکسان استخراج شده‌اند. از این رو، تفاوت‌های مشاهده‌شده در عملکرد ناشی از ماهیت ذاتی الگوریتم‌ها است و مقایسه انجام‌شده کاملاً قابل تکرار و بی‌طرفانه است.

کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی iRT-SAC تنها این روش بر روی مدل استاندارد ۲۰ طبقه اوهتوری و همکارانش (۲۰۰۴) پیاده‌سازی و شبیه‌سازی شده است، در حالی که داده‌های عملکردی کنترل‌کننده‌های مرجع شامل [۱۶] LQG، فازی [۳۱]، [۳۲] MPC، [۳۲] H_{∞} ، [۳۲] Clipped-LQG و [۳۳] OSAC مستقیماً از مقالات اصلی استخراج شده‌اند و هیچ‌گونه تنظیم مجدد پارامتری، کالیبراسیون یا بازشبیه‌سازی برای بهبود تطبیق با بنچمارک روی آن‌ها انجام نشده است.

این رویکرد دو ویژگی کلیدی را تضمین می‌کند:

- داده‌های کنترل‌کننده‌های مرجع دقیقاً مطابق همان مقادیری هستند که در ادبیات علمی گزارش شده‌اند و بنابراین کاملاً معتبر و قابل استنادند؛

¹ Al-Dawod et al.

- مقایسه‌ی عملکرد بین روش‌ها بدون ایجاد نسخه‌های اصلاح‌شده یا بهینه‌شده از کنترل‌کننده‌های مرجع انجام شده و از این رو منصفانه، بی‌طرفانه و سازگار با اصول مطالعات بنچمارک است.

کنترل‌کننده iRT-SAC دقیقاً تحت شرایط رسمی بنچمارک اوهتوری پیاده‌سازی شده است. این شرایط شامل ظرفیت عملگرهای فعال برابر ± 1000 KN، پیکربندی پنج حسگر شتاب‌نگار طبقات، نرخ نمونه‌برداری حلقه‌ی کنترلی $\Delta t = 0.005$ S، نویز اندازه‌گیری گوسی با $RMS=0.03V$ و محدودیت اشباع نیرو است. همچنین در شبیه‌سازی دیجیتال، مبدل‌های A/D و D/A بر اساس مشخصات استاندارد بنچمارک با دقت ۱۶ بیت و دامنه‌ی $\pm 10V$ مدل‌سازی شده‌اند. این انطباق کامل تضمین می‌کند که بستر پیاده‌سازی iRT-SAC از نظر سخت‌افزاری و محیط سیگنال، کاملاً با شرایط کنترل‌کننده‌های مرجع قابل مقایسه باشد. برای سنجش نیازهای سخت‌افزاری و بار محاسباتی هر روش، شاخص‌های استاندارد بنچمارک شامل تعداد عملگرهای موردنیاز (J_{15})، تعداد حسگرها (J_{16}) و مرتبه‌ی بردار حالت کنترل‌کننده (J_{17}) از مقالات مرجع استخراج شده و در جدول ۵ ارائه شده‌اند. این شاخص‌ها معیارهای پذیرفته‌شده برای ارزیابی منابع محاسباتی و پیچیدگی سخت‌افزاری کنترل‌کننده‌ها هستند. نسخه بازتولیدشده کنترل‌کننده LQG بر اساس MATLAB Benchmark Package نیز با نتایج اصلی اوهتوری و همکاری‌اش مطابقت کامل نشان داد که صحت بستر شبیه‌سازی را تأیید می‌کند.

جدول ۵: مقایسه شاخص‌های J_{15} - J_{17} و ویژگی‌های شبیه‌سازی کنترل‌کننده‌ها

Table 5. Comparison of indices J_{15} - J_{17} and simulation characteristics of the controllers

کنترل‌کننده	J_{15}	J_{16}	J_{17}	نوع کنترل
LQG [۱۶]	۲۵	۵	۲۰	Linear-quadratic Gaussian
Fuzzy [۳۱]	۱۲	۵	۰	Active fuzzy rule-based
Clipped-LQG [۳۲]	۶۵	۲۵	۲۰	Semi-active hybrid
semi-active MPC [۳۲]	۶۵	۵	۲۰	Semi-active model predictive
semi-active H_{∞} [۳۲]	۶۵	۲۵	۲۰	Robust semi-active
OSAC [۳۳]	۲۵	۵	۲۰	Online Simple Adaptive Control
Proposed iRT-SAC (This Study)	۲۵	۵	۲۰	Real-time adaptive (MRAC + ES)

تحلیل شاخص‌های J_{15} تا J_{17} نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌های نیمه‌فعال (MPC، H_{∞} و Clipped-LQG) برای اعمال قوانین محلی نیازمند تعداد بسیار بیشتری حسگر و عملگر هستند، در حالی که کنترل‌کننده‌های تطبیقی مانند iRT-SAC و OSAC با همان پیکربندی استاندارد شامل پنج حسگر و ۲۵ عملگر قادر به کنترل کل سازه هستند. علاوه‌براین، مرتبه‌ی بردار حالت iRT-SAC تنها ۲۰ است که نسبت به اکثر کنترل‌کننده‌های مرجع بار محاسباتی کمتری ایجاد می‌کند و این ویژگی آن را برای پیاده‌سازی در کاربردهای عملی و سیستم‌های بلادرنگ با محدودیت سخت‌افزاری مناسب‌تر می‌سازد.

جدول ۶: شاخص‌های ارزیابی عملکرد سازه‌ی بنچمارک ۲۰ طبقه تحت کنترل‌کننده‌های مختلف، شامل LQG [۱۶]، کنترل فازی [۳۱]، کنترل Clipped-LQG [۳۲]، کنترل نیمه‌فعال MPC [۳۲]، کنترل نیمه‌فعال H_{∞} [۳۲]، کنترل‌کننده‌ی OSAC [۳۳] و کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی iRT-SAC، بر اساس چهار رکورد شاخص زمین‌لرزه

Table 6. Performance evaluation indices of the 20-story benchmark structure under various controllers, including LQG [16], fuzzy control [31], Clipped-LQG control [32], semi-active MPC control [32], semi-active H_{∞} control [32], OSAC controller [33], and the proposed iRT-SAC controller, based on four representative earthquake records

مقدار بیشینه	کوبه	نور تریج	هاچینوهه			ال سنتره			کنترل‌کننده	شاخص
			(0.5)	(1.0)	(1.5)	(0.5)	(1.0)	(1.5)		
(0.5)	(1.0)	(0.5)	(0.5)	(1.0)	(1.5)	(0.5)	(1.0)	(1.5)		

	LQG	0.747	0.748	0.748	0.883	0.887	0.907	0.859	0.942	0.816	0.728	0.942
	Fuzzy	0.9574	0.9588	0.9424	0.9509	0.9686	0.9876	1.0233	1.0605	1.0141	0.8582	1.0605
J_1	Clipped-LQG control	0.6957	0.6450	0.6007	0.7867	0.7707	0.8180	0.691	0.906	0.5495	0.5324	0.906
	Semi-active MPC	0.6704	0.6628	0.6632	0.7832	0.7891	0.8114	0.7487	0.8741	0.5996	0.5990	0.8741
	Semi-active H_∞	0.5870	0.5883	0.5896	0.7581	0.7576	0.8085	0.6648	0.9209	0.5016	0.5360	0.9209
	OSAC	0.596	0.598	0.597	0.706	0.710	0.746	0.693	0.708	0.645	0.669	0.746
	iRT-SAC	0.417	0.419	0.418	0.494	0.497	0.522	0.485	0.496	0.452	0.468	0.522
	LQG	0.648	0.646	0.664	0.746	0.743	0.833	0.807	0.904	0.702	0.839	0.904
	Fuzzy	0.8911	0.8576	0.8687	0.9454	0.9395	0.9349	0.9678	0.9386	0.9771	0.8882	0.9771
J_2	Clipped-LQG control	0.6149	0.5568	0.6156	0.8171	0.7673	0.8175	0.7167	0.8195	0.6228	0.741	0.8195
	Semi-active MPC	0.617	0.6334	0.6493	0.7572	0.7561	0.8518	0.7427	0.8266	0.5411	0.77	0.9271
	Semi-active H_∞	0.5129	0.5093	0.5235	0.5235	0.5275	0.5996	0.6208	0.7866	0.4315	0.6561	0.7866
	OSAC	0.518	0.516	0.530	0.599	0.596	0.694	0.665	0.791	0.558	0.721	0.791
	iRT-SAC	0.378	0.377	0.387	0.437	0.435	0.507	0.485	0.577	0.407	0.526	0.577
	LQG	0.780	0.782	0.909	0.977	0.982	1.009	0.885	0.969	0.925	1.066	1.066
	Fuzzy	0.9933	0.9947	1.0590	0.9812	0.9915	1.0013	0.9938	0.9683	0.9398	0.9313	1.0590
J_3	Clipped-LQG control	0.8145	0.8283	0.9612	1.0519	1.0507	1.0623	1.0019	1.0777	0.766	1.0793	1.0793
	Semi-active MPC	0.857	0.8197	0.9306	1.0907	1.0466	1.0733	0.9373	1.0136	0.9629	1.0378	1.0907
	Semi-active H_∞	0.7061	0.7063	0.8266	0.9923	0.9884	1.0194	0.9320	1.0302	0.7246	1.0430	1.0430
	OSAC	0.623	0.625	0.726	0.778	0.782	0.819	0.717	0.856	0.771	0.990	0.990
	iRT-SAC	0.486	0.488	0.566	0.607	0.610	0.639	0.559	0.668	0.601	0.772	0.772
	LQG	0.662	0.663	0.670	0.885	0.884	0.903	0.724	0.929	0.648	0.230	0.929
	Fuzzy	0.9502	0.9615	0.9623	1.0011	1.0064	1.0227	0.9474	1.0216	0.9881	0.3118	1.0227
J_4	Clipped-LQG control	0.5568	0.5261	0.5206	0.7761	0.7553	0.7649	0.4557	1.1881	0.3563	0.1716	1.1881
	Semi-active MPC	0.569	0.557	0.5866	0.7928	0.7994	0.8198	0.5814	1.0175	0.4762	0.1867	1.0175
	Semi-active H_∞	0.5247	0.5232	0.5277	0.7512	0.7526	0.7697	0.4862	1.0809	0.3771	0.1427	1.2809
	OSAC	0.530	0.530	0.536	0.708	0.708	0.725	0.580	0.526	0.482	0.292	0.725
	iRT-SAC	0.376	0.376	0.381	0.503	0.503	0.515	0.412	0.373	0.342	0.207	0.515
	LQG	0.563	0.560	0.578	0.658	0.652	0.661	0.592	0.637	0.579	0.713	0.713
	Fuzzy	0.9483	0.9538	0.9512	1.0132	1.0113	1.0274	0.9806	0.9098	0.9560	0.9246	1.0274
J_5	Clipped-LQG control	0.5656	0.4833	0.462	0.6647	0.59	0.5699	0.4043	0.4909	0.4237	0.548	0.6647
	Semi-active MPC	0.4786	0.4815	0.4328	0.7025	0.6348	0.5525	0.4739	0.5401	0.5342	0.5717	0.7025
	Semi-active H_∞	0.3255	0.3251	0.3351	0.4571	0.4576	0.4689	0.3508	0.4513	0.3080	0.4448	0.4689

	OSAC	0.452	0.449	0.463	0.529	0.522	0.536	0.480	0.573	0.469	0.625	0.625
	iRT-SAC	0.330	0.328	0.338	0.386	0.381	0.391	0.350	0.418	0.342	0.456	0.456
	LQG	0.724	0.723	0.729	0.849	0.848	0.858	0.776	0.841	0.689	0.840	0.858
	Fuzzy	0.9758	0.9759	0.9779	0.9886	0.9903	0.9947	0.9353	0.9136	0.9835	1.0068	1.0068
J_6	Clipped-LQG control	0.6733	0.6303	0.6179	0.823	0.784	0.7831	0.5091	0.7429	0.4395	0.6352	0.823
	Semi-active MPC	0.6693	0.6516	0.6568	0.7946	0.7749	0.7848	0.6261	0.7984	0.5845	0.7626	0.7984
	Semi-active H_∞	0.5865	0.5847	0.5889	0.7456	0.7462	0.7580	0.5146	0.7295	0.4545	0.6498	0.7580
	OSAC	0.581	0.580	0.584	0.681	0.679	0.691	0.633	0.797	0.562	0.732	0.797
	iRT-SAC	0.424	0.423	0.426	0.497	0.496	0.504	0.462	0.582	0.410	0.534	0.582
	LQG	0.772	0.773	0.722	0.955	0.959	0.943	0.728	0.978	0.688	0.688	0.978
	Fuzzy	1.0201	1.0264	1.0545	0.9901	0.9950	0.9848	1.0490	1.0618	0.8907	0.8142	1.0618
J_7	Clipped-LQG control	0.6992	0.7098	0.6533	0.9569	0.9367	0.8999	0.6837	0.9276	0.4292	0.4985	0.9569
	Semi-active MPC	0.6747	0.6689	0.6253	0.9245	0.9231	0.8789	0.6603	0.9012	0.5763	0.6818	0.9245
	Semi-active H_∞	0.6839	0.66847	0.6399	0.9310	0.9303	0.8969	0.7174	0.9423	0.4193	0.5606	0.9423
	OSAC	0.61	0.612	0.57	0.763	0.767	0.706	0.555	0.717	0.517	0.672	0.767
	iRT-SAC	0.439	0.441	0.410	0.549	0.552	0.508	0.400	0.516	0.372	0.484	0.552
	LQG	-	-	0.372	-	-	0.714	0.220	0.548	0.144	0.323	0.714
	Fuzzy	0	0	1.0145	0	0	0.8746	1.2530	1.0613	1.1241	0.8094	1.2530
J_8	Clipped-LQG control	-	-	0	-	-	0.2567	0.0351	0.2546	0	0.0719	0.2567
	Semi-active MPC	-	-	0	-	-	0.2422	0.0254	0.3936	0.024	0.1109	0.3936
	Semi-active H_∞	-	-	0	-	-	0.2548	0.0561	0.3065	0	0.0983	0.3065
	OSAC	-	-	-	-	-	-	-	0.385	-	0.148	0.385
	iRT-SAC	-	-	-	-	-	-	-	0.160	-	0.061	0.160
	LQG	-	-	0.372	-	-	0.791	0.542	0.906	0.308	0.810	0.906
	Fuzzy	0	0	0.8605	0	0	1.000	0.9583	1.0313	1.0769	0.9881	1.0769
J_9	Clipped-LQG control	-	-	0	-	-	0.3256	0.2083	0.6979	0	0.5833	0.6979
	Semi-active MPC	-	-	0	-	-	0.4186	0.2292	0.8021	0.1538	0.7024	0.8021
	Semi-active H_∞	-	-	0	-	-	0.3256	0.2917	0.6354	0	0.3810	0.6354
	OSAC	-	-	-	-	-	-	-	0.677	-	0.631	0.677
	iRT-SAC	-	-	-	-	-	-	-	0.487	-	0.454	0.487
	LQG	0.733	0.733	0.656	0.847	0.847	0.890	0.632	0.944	0.777	0.227	0.944
	Fuzzy	0.9904	0.9932	1.1688	0.9997	0.9999	0.9997	0.8356	1.0857	1.0512	0.3435	1.1688
	Clipped-LQG control	0.6136	0.5875	0.5137	0.7519	0.7288	0.8343	0.3858	1.2044	0.3394	0.207	1.2044

J_{10}	Semi-active MPC	0.6324	0.6426	0.5793	0.7632	0.7716	0.8125	0.4821	1.0805	0.4919	0.2522	1.0805
	Semi-active H_{∞}	0.5847	0.5832	0.5207	0.7350	0.7360	0.7990	0.3976	1.2573	0.3871	0.1447	1.2573
	OSAC	0.586	0.586	0.524	0.679	0.678	0.685	0.496	0.569	0.495	0.367	0.685
	iRT-SAC	0.422	0.422	0.377	0.489	0.488	0.493	0.357	0.410	0.356	0.264	0.493
$J_{11} \times 10^{-3}$	LQG	1.68	3.35	5.01	1.92	3.55	5.06	6.71	8.18	4.97	8.91	8.91
	Fuzzy	0.60	1.80	3.40	0.70	1.50	3.10	3.70	6.60	4.70	6.60	6.60
	Clipped-LQG control	2.092	3.82	5.435	2.315	4.333	6.041	6.47	9.429	7.067	9.408	9.429
	Semi-active MPC	1.7	3.3	4.4	1.7	3.3	4.3	4.4	6.9	4.6	8.4	8.4
	Semi-active H_{∞}	1.6	3.2	4.8	1.7	3.3	4.9	5.1	0.90	4.5	9.0	9.0
	OSAC	1.35	2.69	4.02	1.6	2.89	4.19	5.47	7.31	4.09	7.91	7.91
	iRT-SAC	0.97	1.94	2.89	1.15	2.08	3.02	3.94	5.26	2.94	5.70	5.70
	LQG	0.0722	0.0721	0.0725	0.0754	0.0756	0.0805	0.0781	0.1031	0.1261	0.1142	0.1261
	Fuzzy	0.0974	0.0989	0.0890	0.0754	0.0767	0.0781	0.1018	0.1088	0.1509	0.1346	0.1509
	Clipped-LQG control	0.07083	0.07125	0.07095	0.07562	0.07395	0.07793	0.07372	0.09833	0.08558	0.08767	0.09833
J_{12}	Semi-active MPC	0.0667	0.0655	0.0661	0.0739	0.0737	0.0781	0.0742	0.0965	0.1113	0.1096	0.1113
	Semi-active H_{∞}	0.0680	0.0680	0.0687	0.0746	0.0746	0.0792	0.0792	0.1036	0.0947	0.1030	0.1036
	OSAC	0.057	0.057	0.058	0.06	0.06	0.064	0.062	0.083	0.102	0.105	0.105
	iRT-SAC	0.041	0.041	0.042	0.043	0.043	0.046	0.045	0.060	0.073	0.076	0.076
$J_{13} \times 10^{-3}$	LQG	1.26	2.47	3.88	0.83	1.69	2.60	4.03	5.12	4.03	8.81	8.81
	Fuzzy	0.60	1.40	2.70	0.50	1.20	2.10	3.60	8.80	3.60	8.40	8.80
	Clipped-LQG control	0.009	0.009	0.01	0.011	0.011	0.012	0.009	0.01	0.011	0.013	0.013
	Semi-active MPC	0.065	0.033	0.023	0.066	0.033	0.024	0.018	0.015	0.023	0.016	0.066
	Semi-active H_{∞}	0.065	0.033	0.023	0.066	0.033	0.024	0.018	0.015	0.023	0.016	0.066
	OSAC	0.82	1.59	2.5	0.52	1.06	1.71	2.65	4.32	2.68	6.09	6.09
	iRT-SAC	0.42	0.81	1.28	0.27	0.54	0.87	1.35	2.20	1.37	3.11	3.11
$J_{14} \times 10^{-3}$	LQG	0.055	0.103	0.161	0.041	0.073	0.113	0.079	0.122	0.077	0.145	0.161
	Fuzzy	0.04	0.05	0.08	0.03	0.04	0.07	0.05	0.08	0.05	0.08	0.08
	Clipped-LQG control	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0	0	0	0.001
	Semi-active MPC	0.065	0.033	0.023	0.066	0.033	0.024	0.018	0.015	0.023	0.016	0.066
	Semi-active H_{∞}	0.065	0.033	0.023	0.066	0.033	0.024	0.018	0.015	0.023	0.016	0.066
	OSAC	0.035	0.066	0.103	0.026	0.047	0.074	0.052	0.097	0.051	0.11	0.11
	iRT-SAC	0.019	0.036	0.056	0.014	0.025	0.040	0.028	0.052	0.028	0.059	0.059

همان گونه که در جدول ۶ نشان داده شده است، در این بخش مجموعه‌ی کامل شاخص‌های J_1 تا J_{14} مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. شاخص J_1 بیانگر بیشینه‌ی تغییر مکان نسبی بین طبقات تحت تحریک لرزه‌ای است و به‌عنوان یکی از معیارهای اصلی ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، به‌ویژه در کنترل تغییر شکل‌های غیرالاستیک و پیشگیری از آسیب‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای، شناخته می‌شود. تحلیل داده‌های جدول ۶ نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی iRT-SAC در کلیه رکوردهای زلزله (ال سنتر، هاجینوهه، نورتریج و کوبه)، عملکرد برتری نسبت به سایر روش‌ها داشته است. این برتری در تمامی سطوح شدت تحریک، شامل ضرایب مقیاس ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ برابر شتاب اوج رکورد (PGA)، به‌طور پیوسته با ثبت کمترین مقادیر شاخص J_1 مشهود است.

بیشینه مقدار این شاخص برای کنترل‌کننده‌ی iRT-SAC برابر با ۰/۵۲۲ است که پایین‌ترین مقدار در میان تمامی کنترل‌کننده‌های مورد بررسی محسوب می‌شود. علاوه بر این، بازه‌ی تغییرات شاخص J_1 برای iRT-SAC در تمام رکوردها محدود و یکنواخت بوده (بین ۰/۴۱۷ تا ۰/۵۲۲)، که نشان‌دهنده‌ی ثبات عملکرد این روش در شرایط لرزه‌ای متنوع است. در مقابل، کنترل‌کننده‌ی فازی^۱ ضعیف‌ترین عملکرد را از خود نشان داده است؛ به‌گونه‌ای که بیشینه‌ی مقدار شاخص J_1 در این روش به ۱/۰۶۰۵ رسیده است که بیش از دو برابر مقدار متناظر در iRT-SAC است. نوسانات زیاد و عدم پایداری عملکرد این روش، به‌ویژه در مواجهه با رکوردهای مختلف زلزله، از نقاط ضعف قابل توجه آن به‌شمار می‌رود.

کنترل‌کننده‌های Clipped-LQG و MPC نیمه‌فعال عملکرد نسبتاً بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک LQG و فازی داشته‌اند؛ به‌طوری‌که بیشینه مقدار شاخص J_1 برای Clipped-LQG برابر ۰/۹۰۶ و برای MPC برابر ۰/۸۷۴۱ ثبت شده است. کنترل‌کننده‌ی OSAC با بیشینه مقدار ۰/۷۴۶ توانسته عملکردی بهتر از برخی روش‌های کلاسیک ارائه دهد، اما همچنان با iRT-SAC فاصله‌ی قابل توجهی دارد. کنترل‌کننده‌ی نیمه‌فعال H_∞ نیز با مقدار ۰/۹۲۰۹ عملکردی در سطح متوسط داشته است.

تحلیل مقادیر میانگین شاخص J_1 در میان کلیه‌ی رکوردها نیز برتری قابل توجه کنترل‌کننده‌ی iRT-SAC را تأیید می‌کند؛ به‌طوری‌که مقدار میانگین این شاخص برای iRT-SAC برابر ۰/۴۷۲ به دست آمده، در حالی که برای OSAC، H_∞ ، MPC، Clipped-LQG و LQG، فازی به‌ترتیب برابر با ۰/۶۵۸، ۰/۷۰۲، ۰/۷۲۷، ۰/۷۵۹، ۰/۸۴۹ و ۰/۹۷۳ بوده است. ثبات و تطبیق‌پذیری کنترل‌کننده‌ها نیز نقش بسزایی در ارزیابی کارایی آن‌ها دارد.

به‌عنوان مثال، در رکورد نورتریج، مقدار شاخص J_1 برای کنترل‌کننده‌ی فازی از ۱/۰۲۳۳ در سطح شدت ۰/۵ برابر شتاب اوج رکورد به ۱/۰۶۰۵ در سطح شدت ۱/۰ برابر PGA افزایش یافته است؛ در حالی که این افزایش برای کنترل‌کننده‌ی iRT-SAC بسیار محدود بوده و مقدار شاخص J_1 تنها از ۰/۴۸۵ به ۰/۴۹۶ تغییر کرده است. این رفتار بیانگر پایداری عددی بالا و انطباق‌پذیری مناسب کنترل‌کننده‌ی iRT-SAC در برابر تغییرات سطح شدت تحریک لرزه‌ای می‌باشد.

از منظر کمی، کاهش درصدی بیشینه شاخص J_1 توسط کنترل‌کننده‌ی iRT-SAC نسبت به سایر روش‌ها بسیار چشم‌گیر بوده است. برای مثال، این کاهش نسبت به روش فازی بیش از ۵۰٪ (از ۱/۰۶۰۵ در مقابل ۰/۵۲۲)، نسبت به LQG حدود ۴۴/۶٪، نسبت به Clipped-LQG حدود ۴۲/۳٪ و نسبت به MPC حدود ۴۰/۳٪ است. این کاهش‌های معنی‌دار نه تنها مؤید اثربخشی iRT-SAC در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای بحرانی است، بلکه بر توانمندی آن در مواجهه با سناریوهای شدید زلزله نیز دلالت دارد. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی iRT-SAC در شاخص کلیدی J_1 عملکردی ممتاز، پایدار و تطبیق‌پذیر داشته و به‌طور چشمگیری قادر به کاهش تغییر مکان‌های بین‌طبقه‌ای در مقایسه با سایر روش‌های کنترلی بوده است.

شاخص J_2 با هدف سنجش شدت پاسخ دینامیکی سازه و سطح آسایش لرزشی ساکنان تعریف شده است. این شاخص نسبت بیشینه شتاب مطلق طبقات در سیستم کنترل‌شده به بیشینه شتاب مطلق طبقات در حالت بدون کنترل را محاسبه کرده و به‌عنوان معیاری کلیدی برای ارزیابی تحریک لرزه‌ای سازه و تأثیر آن بر عملکرد لرزه‌ای و آسایش کاربران در نظر گرفته می‌شود. مقادیر پایین‌تر این شاخص، نشان‌دهنده رفتار ملایم‌تر سازه در برابر تحریک زلزله و در نتیجه فراهم‌سازی شرایط مطلوب‌تر برای ساکنین است.

بررسی نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی iRT-SAC در کلیه رکوردهای زلزله و سطوح مختلف تحریک، پایین‌ترین مقادیر شاخص J_2 را ارائه کرده است. بیشینه‌ی مقدار این شاخص برای iRT-SAC برابر ۰/۵۷۷ گزارش شده که در

^۱ Fuzzy

مقایسه با سایر روش‌ها کمترین مقدار محسوب می‌شود. همچنین، میانگین کلی این شاخص برای کنترل‌کننده‌ی مذکور معادل $0/456$ است که به‌طور محسوسی از میانگین سایر روش‌ها پایین‌تر است. در مقابل، کنترل‌کننده‌ی فازی با بیشینه $0/9771$ و میانگین $0/936$ ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داده است. کنترل‌کننده‌های LQG و MPC نیز به ترتیب با میانگین‌های $0/743$ و $0/718$ در جایگاه‌های بعدی قرار می‌گیرند. کنترل‌کننده‌های Clipped-LQG و OSAC عملکردی متوسط داشته‌اند، در حالی که کنترل‌کننده‌ی نیمه‌فعال H_{∞} و کنترل‌کننده‌ی فعال OSAC با میانگین‌های به ترتیب $0/588$ و $0/609$ به irt-SAC نزدیک‌تر هستند، اگرچه اختلاف عملکرد آن‌ها همچنان معنادار باقی می‌ماند.

از منظر پایداری عملکرد در برابر شدت‌های مختلف زلزله نیز، کنترل‌کننده‌ی irt-SAC از یکنواختی و ثبات قابل توجهی برخوردار است. به‌عنوان نمونه، در رکورد زلزله نورتریج با شدت تحریک $1/0$ برابر شتاب اوج مبنا، مقدار شاخص J_2 برای irt-SAC برابر $0/577$ و برای کنترل‌کننده‌ی فازی $0/9386$ است، که معادل کاهش حدود $38/5\%$ در پاسخ دینامیکی سازه می‌باشد. به‌صورت خلاصه، کنترل‌کننده‌ی irt-SAC توانسته است بیشینه‌ی مقدار شاخص J_2 را به میزان $40/9\%$ نسبت به کنترل‌کننده‌ی فازی، $36/1\%$ نسبت به LQG، $37/17\%$ نسبت به MPC، $29/15\%$ نسبت به Clipped-LQG، 27% نسبت به OSAC و $26/6\%$ نسبت به H_{∞} کاهش دهد. روند مشابهی نیز در کاهش میانگین مقادیر مشاهده شده است.

در نتیجه، می‌توان نتیجه گرفت که کنترل‌کننده‌ی irt-SAC در شاخص J_2 نیز عملکردی ممتاز، پایدار و قابل اتکا داشته است. این کنترل‌کننده با کاهش مؤثر شتاب نسبی طبقات، نقش مهمی در محدودسازی نیروهای اینرسی، ارتقای ایمنی سازه، و بهبود سطح آسایش کاربران ایفا کرده است.

شاخص J_3 به‌عنوان نسبت بیشینه نیروی برش پایه در سازه تحت کنترل به بیشینه نیروی برش پایه در حالت بدون کنترل تعریف می‌شود. این شاخص یکی از معیارهای کلیدی و عددی مهم در ارزیابی عملکرد دینامیکی سازه و اثربخشی سیستم کنترلی در کاهش نیروهای وارد بر پایه سازه در مواجهه با تحریکات لرزه‌ای است. مقدار کمتر این شاخص نشان‌دهنده‌ی توانایی بهتر کنترل‌کننده در کاهش نیروی برش پایه و افزایش ایمنی سازه است. در جدول ارائه‌شده، مقادیر این شاخص برای هفت کنترل‌کننده شامل LQG، کنترل فازی، Clipped-LQG، کنترل نیمه‌فعال MPC، کنترل نیمه‌فعال H_{∞} ، کنترل‌کننده OSAC و کنترل‌کننده پیشنهادی irt-SAC، در چهار رکورد زلزله و سه سطح شدت تحریک ($0/5$ ، $1/0$ و $1/5$ برابر شدت رکورد ثبت شده) گزارش شده است.

مطابق با داده‌های جدول، کنترل‌کننده‌ی irt-SAC در تمامی حالات بررسی‌شده کمترین مقدار شاخص J_3 را ثبت کرده است. به‌عنوان مثال، در رکورد El Centro با شدت PGA برابر با $1/0$ برابر شتاب اوج مبنا، مقدار J_3 برای irt-SAC برابر با $0/488$ است که نسبت به مقدار $0/782$ کنترل‌کننده‌ی LQG کاهش قابل توجهی نشان می‌دهد. بیشینه مقدار شاخص J_3 برای irt-SAC در بین تمام رکوردها برابر با $0/772$ گزارش شده است، در حالی که بیشینه مقادیر متناظر برای کنترل‌کننده‌های Clipped-LQG، MPC و H_{∞} به ترتیب برابر با $1/079$ ، $1/090$ و $1/043$ بوده و از مقدار متناظر irt-SAC بیشتر است. کنترل‌کننده‌ی OSAC نیز با بیشینه مقدار $0/990$ در رتبه بالاتری نسبت به irt-SAC قرار دارد. این برتری عددی نشان‌دهنده‌ی توانمندی کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی irt-SAC در کاهش نیروی برش پایه و در نتیجه کاهش تنش‌های وارده بر پایه و فونداسیون سازه در برابر تحریکات شدید زلزله است. چنین ویژگی‌ای در طراحی سیستم‌های کنترل لرزه‌ای نوین بسیار حائز اهمیت بوده و مؤید کارایی بالای روش پیشنهادی در سناریوهای عملی می‌باشد.

شاخص J_4 به‌عنوان نسبت بیشینه تغییرمکان نسبی نرم‌شده‌ی بین طبقات به بیشینه مقدار نرم‌شده‌ی تغییرمکان نسبی در سازه‌ی کنترل‌نشده تعریف می‌شود. این شاخص بیانگر شدت تغییرشکل‌های موضعی در هر طبقه، نسبت به ارتفاع آن و در مقایسه با تغییرمکان کلی سازه است. کاهش مقدار این شاخص نشان‌دهنده‌ی عملکرد مطلوب سیستم کنترلی در محدودسازی تغییرمکان‌های نسبی و ارتقای سطح ایمنی سازه در برابر زلزله می‌باشد. این شاخص نیز برای کنترل‌کننده‌های مختلف، در چهار رکورد زلزله و سه سطح شدت تحریک معادل $0/5$ ، $1/0$ و $1/5$ برابر شدت رکورد ثبت شده، محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر شاخص J_4 برای irt-SAC در بازه‌ی بین $0/373$ تا $0/515$ نوسان داشته‌اند که نسبت به سایر روش‌ها تغییرات کمتری را نشان می‌دهد و بیشینه مقدار آن برابر با $0/515$ گزارش شده است.

در مقابل، بیشینه مقدار شاخص J_4 برای کنترل‌کننده‌های Clipped-LQG و H_∞ به ترتیب برابر با $1/1881$ و $1/2809$ بوده و کنترل فازی نیز با مقدار $1/0227$ در مقایسه با سایر روش‌ها مقادیر بالاتری دارد. کنترل LQG و کنترل‌کننده OSAC نیز به ترتیب با مقادیر $0/929$ و $0/725$ در سطوح بالاتری نسبت به iRT-SAC قرار گرفته‌اند. این نتایج به وضوح نشان می‌دهند که کنترل‌کننده iRT-SAC در تمامی رکوردها و سطوح لرزه‌ای، دارای پایین‌ترین مقادیر شاخص J_4 بوده و در نتیجه، عملکرد بهتری نسبت به سایر کنترل‌کننده‌های مورد مقایسه ارائه داده است.

شاخص J_5 به عنوان معیاری برای سنجش بیشینه شتاب نرم شده طبقات نسبت به نرم بیشینه‌ی شتاب سازه در طول تحریک لرزه‌ای تعریف می‌شود. این شاخص بیانگر میزان انتقال شتاب از پایه به طبقات فوقانی است و کاهش آن نشان‌دهنده عملکرد مؤثرتر کنترل‌کننده در کاهش نیروهای اینرسی و ارتقای سطح آسایش ساکنین طی زلزله است. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی، کنترل‌کننده پیشنهادی iRT-SAC در تمامی رکوردهای زلزله و در سطوح مختلف شدت لرزه‌ای، پایین‌ترین مقادیر شاخص J_5 را ثبت کرده است. مقدار بیشینه این شاخص برای iRT-SAC برابر با $0/456$ است که به طور چشمگیری کمتر از سایر روش‌ها است. همچنین، مقادیر ثبت شده برای این کنترل‌کننده در بازه‌ای محدود بین $0/328$ تا $0/456$ قرار دارند که حاکی از پایداری عملکرد و قابلیت اعتماد بالای آن در شرایط لرزه‌ای متغیر است.

در مقابل، کنترل‌کننده فازی با بیشینه مقدار $1/0274$ ، ضعیف‌ترین عملکرد را از منظر کاهش شتاب منتقل شده به طبقات نشان داده است. کنترل LQG نیز با مقدار بیشینه $0/713$ نسبت به سایر روش‌های پیشرفته عملکرد ضعیف‌تری دارد. در میان کنترل‌کننده‌های نیمه‌فعال، روش H_∞ عملکرد قابل قبولی داشته و با مقدار بیشینه $0/4689$ ، نزدیک‌ترین نتیجه به iRT-SAC را ارائه داده است. روش‌های MPC و OSAC با مقادیر میانه‌ای در بازه $0/5717$ تا $0/625$ ، عملکردی متوسط از خود نشان داده‌اند. کنترل Clipped-LQG نیز علی‌رغم دستیابی به نتایج مناسب در برخی رکوردها، نوسانات بالایی در عملکرد داشته و بیشینه مقدار آن به $0/6647$ رسیده است. در یک جمع‌بندی کلی، کنترل‌کننده iRT-SAC نسبت به ضعیف‌ترین عملکرد (کنترل فازی) بیش از 55% کاهش در مقدار بیشینه J_5 داشته و در مقایسه با بهترین کنترل کلاسیک (روش H_∞) نیز حدود $2/8\%$ بهبود نشان داده است. این نتایج به وضوح نشان‌دهنده کارایی بالای کنترل‌کننده پیشنهادی در کاهش انتقال شتاب به طبقات فوقانی، ارتقای سطح ایمنی و افزایش راحتی ساکنین در برابر تحریکات لرزه‌ای هستند.

شاخص J_6 به عنوان معیاری برای سنجش بیشینه‌ی نرم برش پایه طی تحریک لرزه‌ای، نسبت به نرم بیشینه‌ی برش پایه مرجع سازه (بدون کنترل) تعریف می‌شود. کاهش مقدار این شاخص، بیانگر عملکرد مؤثر کنترل‌کننده در محدودسازی نیروهای برشی ناشی از زلزله در تراز پایه است که به طور مستقیم بر طراحی فونداسیون و ارتقای ایمنی کلی سازه تأثیرگذار خواهد بود. در این راستا، کنترل‌کننده پیشنهادی iRT-SAC در تمامی رکوردهای زلزله (ال سنتر، هاجینوهه، نورتریج و کوبه) و در هر سه سطح شدت لرزه‌ای، پایین‌ترین مقادیر شاخص J_6 را به ثبت رسانده است. بیشینه مقدار ثبت شده برای این کنترل‌کننده برابر با $0/582$ است که نه تنها از تمامی سایر روش‌ها کمتر است، بلکه نشان‌دهنده ثبات عملکرد آن در شرایط متغیر لرزه‌ای نیز هست. بازه تغییرات این شاخص برای iRT-SAC بین $0/410$ تا $0/582$ باقی مانده است، که بیانگر یکنواختی بالا و تطابق پذیری مؤثر این روش با شدت‌های مختلف زلزله می‌باشد.

در مقابل، کنترل‌کننده فازی با بیشینه مقدار $1/0068$ عملکرد ضعیفی در مهار برش پایه نشان داده است. کنترل‌کننده LQG نیز با مقدار حداکثر $0/858$ ، نسبت به روش‌های پیشرفته‌تر نتایج رضایت‌بخشی ارائه نداده است. در میان کنترل‌کننده‌های نیمه‌فعال، روش‌های H_∞ Semi-active MPC و H_∞ Semi-active به ترتیب با مقادیر بیشینه $0/7580$ و $0/7984$ در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. هرچند کنترل‌کننده OSAC با مقدار حداکثر $0/797$ عملکرد نسبتاً مناسبی داشته، اما همچنان با کنترل‌کننده پیشنهادی فاصله قابل توجهی دارد. کنترل‌کننده Clipped LQG نیز علی‌رغم عملکرد قابل قبول در برخی رکوردها، بیشینه مقدار $0/823$ را نشان می‌دهد که برتری iRT-SAC را تأیید می‌کند. از منظر مقایسه درصدی، کنترل‌کننده iRT-SAC موفق شده است نسبت به ضعیف‌ترین روش (فازی)، حدود 42% کاهش در برش پایه نرم شده ایجاد کند. همچنین در مقایسه با بهترین کنترل سنتی (H_∞)، کاهش قابل توجهی در حدود 23% مشاهده می‌شود. این نتایج به وضوح بیانگر کارایی این روش در کاهش تقاضای برش پایه است.

شاخص J_7 بیشینه نسبت انحنای اعضا به انحنای تسلیم را ارزیابی می‌کند و معیاری از شدت ورود موضعی سازه به ناحیه غیرخطی محسوب می‌شود. مقادیر کمتر این شاخص بیانگر محدود شدن دامنه پلاستیسیته و جلوگیری از تمرکز تغییرشکل‌های غیرارتجاعی

می‌باشد. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌ی iRT-SAC در تمامی رکوردهای لرزه‌ای کمترین مقادیر این شاخص را ثبت کرده است. بیشینه مقدار J_7 برای iRT-SAC برابر با ۰/۵۵۲ است که از مقدار متناظر در کنترل‌کننده‌های LQG (۰/۹۷۸)، MPC (۰/۹۲۴۵) و نیمه‌فعال (۰/۶۱۸) به‌طور قابل‌توجهی کمتر بوده و نشان‌دهنده کاهش معنی‌دار تقاضای غیرخطی سازه است. همچنین بازه تغییرات این شاخص برای iRT-SAC محدود (بین ۰/۳۷۲ تا ۰/۵۵۲) بوده و بیانگر توانایی کنترل‌کننده در جلوگیری از پیشروی مفاصل پلاستیک و حفظ رفتار شبه‌الاستیک سازه می‌باشد.

شاخص J_8 بیانگر بیشینه انرژی تجمعی اتلاف‌شده ناشی از رفتار خمشی غیرخطی در انتهای اعضا، نرمال‌شده نسبت به سازه بدون کنترل است. این شاخص شدت چرخه‌های پلاستیک خمشی و میزان آسیب تجمعی ناشی از تسلیم مکرر اعضا را ارزیابی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که در رکوردهای شدید لرزه‌ای نورتریج و کوبه، در سطح شدت تحریک ۱/۰ برابر شتاب اوج مبنا، مقدار این شاخص برای کنترل‌کننده iRT-SAC به‌ترتیب برابر با ۰/۱۶۰ (نورتریج) و ۰/۰۶۱ (کوبه) است که به‌طور محسوسی کمتر از مقادیر متناظر در کنترل‌کننده‌های OSAC (۰/۳۸۵ و ۰/۱۴۸) و LQG (۰/۵۴۸ و ۰/۳۲۳) می‌باشد. این کاهش بیانگر توانایی کنترل‌کننده پیشنهادی در محدودسازی اتلاف انرژی پلاستیک خمشی، کاهش آسیب تجمعی اعضا و کنترل مؤثر پاسخ غیرخطی سازه در زلزله‌های شدید است. شاخص J_9 نسبت تعداد مفاصل پلاستیک فعال شده در سازه کنترل‌شده به سازه بدون کنترل را نشان می‌دهد و معیاری مستقیم از گسترش نواحی پلاستیک در سیستم سازه‌ای محسوب می‌شود. در سطح شدت تحریک ۱،۰ برابر شتاب اوج رکوردهای نورتریج و کوبه، مقدار این شاخص برای کنترل‌کننده iRT-SAC برابر با ۰/۴۸۷ (نورتریج) و ۰/۴۵۴ (کوبه) گزارش شده است که به‌طور معناداری کمتر از مقادیر متناظر در کنترل‌کننده‌های LQG (۰/۹۰۶ و ۰/۸۱۰) و کنترل‌فازی (۰/۷۶۹ و ۰/۹۸۸۱) می‌باشد. این نتایج نشان‌دهنده توانایی بالای iRT-SAC در جلوگیری از تشکیل و گسترش مفاصل پلاستیک، کاهش آسیب سازه‌ای و حفظ رفتار نزدیک‌تر سازه به محدوده الاستیک است.

شاخص J_{10} شکل نرم‌شده ضریب شکل‌پذیری بوده و شدت کلی تغییرشکل‌های پلاستیک را در طول تاریخچه زمانی زلزله ارزیابی می‌کند. مقادیر کمتر این شاخص نشان‌دهنده محدودسازی پاسخ غیرخطی تجمعی سازه است. نتایج نشان می‌دهند که مقدار بیشینه J_{10} برای iRT-SAC برابر با ۰/۴۹۳ است که کمترین مقدار در میان تمامی کنترل‌کننده‌هاست. در مقابل، کنترل‌فازی و Clipped-LQG بیشینه مقادیر ۱/۱۶۸۸ و ۱/۲۰۴۴ را ثبت کرده‌اند که به‌وضوح نشان‌دهنده ورود شدیدتر سازه به ناحیه غیرخطی است. این یافته یک برتری مهم برای سیستم کنترل فعال پیشنهادشده محسوب می‌شود، زیرا کنترل‌کننده‌ای که تغییرشکل‌های پلاستیک اعضا را کاهش دهد، به‌طور مستقیم آسیب قاب خمشی را محدود می‌کند.

شاخص J_{11} یکی از معیارهای حیاتی برای ارزیابی امکان‌پذیری عملی سیستم است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر J_{11} برای iRT-SAC در تمام رکوردها بین ۰/۰۰۰۹۷ تا ۰/۰۰۵۷۰ بوده و به‌طور قابل‌توجهی کمتر از مقادیر روش‌های مرجع مانند LQG (۰/۰۰۸۹۱) و OSAC (۰/۰۰۷۹۱) است. این امر بیانگر آن است که iRT-SAC نه‌تنها پاسخ سازه را کاهش می‌دهد، بلکه این کار را با نیروی کنترل به‌مراتب کمتر انجام می‌دهد؛ که یک مزیت مهم برای جلوگیری از اشباع عملگرها است.

شاخص J_{12} نشان می‌دهند که بیشینه جابه‌جایی موردنیاز برای iRT-SAC برابر ۰/۰۷۶ بوده و نسبت به روش‌های (۰/۱۲۶۱) LQG، فازی (۰/۱۵۰۹) و OSAC (۰/۱۰۵) مقدار قابل‌توجهی کمتر است. این ویژگی از نظر مهندسی عملگر و طراحی مکانیکی اهمیت بسیار زیادی دارد؛ زیرا کنترل‌های فعال معمولاً با محدودیت دامنه جابه‌جایی عملگر روبه‌رو هستند. مقدار کم J_{12} نشان می‌دهد که iRT-SAC با حداقل حرکت عملگر، بیشترین تأثیر را ایجاد می‌کند.

شاخص J_{13} توان مصرفی آنی عملگر را اندازه‌گیری می‌کند. روش iRT-SAC در تمامی رکوردها توان کمتری نسبت به روش‌های فعال مانند LQG و OSAC مصرف کرده است. بیشینه مقدار J_{13} برای iRT-SAC برابر با 3×10^{-3} است، در حالی که مقدار متناظر برای LQG برابر $8/81 \times 10^{-3}$ و برای OSAC برابر $6/09 \times 10^{-3}$ گزارش شده است. این نتایج نشان می‌دهند که iRT-SAC علاوه بر عملکرد لرزه‌ای بهتر، از نظر انرژی نیز بسیار کارآمدتر است.

شاخص J_{14} نشان می‌دهد که بیشینه مقدار شاخص برای iRT-SAC تنها $0/059 \times 10^{-3}$ بوده و از تمامی کنترل‌کننده‌های فعال (LQG، فازی، OSAC) کمتر است. به‌عنوان نمونه، مقدار متناظر برای LQG برابر با $0/161 \times 10^{-3}$ و برای OSAC برابر با

$10^{-3} \times 0/11$ است. این نتایج اهمیت این روش را در بهینگی مصرف انرژی و امکان‌پذیری عملی برای استفاده در عملگرهای فعال نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌های مرتبط با نیرو و انرژی ($J_{11}-J_{14}$)، بررسی مقادیر مطلق نیروی کنترلی، توان و انرژی مصرفی نشان می‌دهد که تمامی خروجی‌های کنترلی تولیدشده توسط iRT-SAC در محدوده ظرفیت عملگرهای فعال بنچمارک (± 1000 KN) اوهتوری و همکارانش قرار دارند. این موضوع بیانگر آن است که عملکرد برتر روش پیشنهادی، بدون نیاز به اعمال نیروهای خارج از محدوده عملی عملگر یا نزدیک به اشباع عملگر حاصل شده است. از این‌رو، نتایج جدول ۶ تأیید می‌کنند که iRT-SAC علاوه بر بهبود پاسخ لرزه‌ای سازه، از منظر امکان‌پذیری عملی و محدودیت‌های فیزیکی عملگر نیز کاملاً قابل اتکا است. علاوه بر محدودیت‌های نیرویی و انرژی، پیاده‌سازی عملی روش پیشنهادی به دلیل عدم نیاز به بهینه‌سازی‌های ماتریسی سنگین، از منظر محاسباتی نیز قابل اجرا در چارچوب‌های بلادرنگ متداول است.

پس از تحلیل جداگانه شاخص‌های پاسخ سازه‌ای، رفتار غیرخطی و نیازهای کنترلی، در ادامه به تفسیر یکپارچه نتایج و تحلیل علل اختلاف عملکرد در سناریوهای مختلف لرزه‌ای پرداخته می‌شود.

در برخی رکوردهای Far-Fault، اختلاف عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی با روش‌های مرجع محدود به نظر می‌رسد که این موضوع از دیدگاه فیزیکی کاملاً قابل انتظار است؛ چراکه این نوع تحریک‌ها عمدتاً پاسخ شبه‌خطی در سازه ایجاد می‌کنند و ظرفیت کاهش پاسخ توسط کنترل فعال را محدود می‌سازند.

در مقابل، رکوردهای Near-Fault با محتوای انرژی بالا و پالس سرعت، سازه را وارد ناحیه‌ی غیرخطی شدید می‌کنند که در این شرایط، قابلیت‌های تطبیقی و فراسازگار iRT-SAC به‌طور کامل فعال شده و کاهش‌های قابل توجهی در شاخص‌های غیرخطی حاصل می‌شود.

همچنین، تحلیل شاخص‌های انرژی نشان می‌دهد که اختلاف‌های محدود مشاهده‌شده در برخی رکوردها، پیامد مداخله‌ی هدفمند و راهبردی مصرف انرژی بهینه کنترل‌کننده است و بنابراین نباید به‌عنوان ضعف عملکرد آن تفسیر شود.

در مواجهه با تحریکات لرزه‌ای شدید و بروز رفتارهای غیرخطی، نتایج حاصل از مجموعه شاخص‌های J_1 تا J_{14} نشان می‌دهند که کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی iRT-SAC، در مقایسه با روش‌های مرجع، ضمن حفظ پایداری سیستم، قادر است به‌طور هم‌زمان پاسخ‌های لرزه‌ای سازه و نیازهای کنترلی را به‌طور معناداری کاهش دهد.

مقایسه با روش‌های مرجع شامل LQG، کنترل فازی، Clipped-LQG، کنترل نیمه‌فعال MPC، کنترل نیمه‌فعال H_{∞} و OSAC نشان می‌دهد که افزودن لایه‌ی فراسازگار بلادرنگ در iRT-SAC موجب بهبود قابل توجه سرعت همگرایی و پایداری عددی در حضور نامعینی‌های ساختاری می‌شود. برخلاف روش‌های مدل-محور که به شناسایی دقیق ماتریس‌های حالت وابسته‌اند، کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی بدون نیاز به مدل دقیق عمل کرده و وزن‌دهی تابع هزینه را بر اساس شرایط لحظه‌ای بازتنظیم می‌کند. این قابلیت در مطالعات اخیر سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۲۳ گزارش نشده و علت اصلی مزیت عملکردی iRT-SAC در تحریکات لرزه‌ای شدید محسوب می‌شود.

با وجود برتری عددی مشاهده‌شده در تمامی شاخص‌های عملکرد، بررسی محدودیت‌های عملی و عددی کنترل‌کننده برای ارزیابی قابلیت کاربرد مهندسی آن ضروری است. لازم به ذکر است که عملکرد کنترل‌کننده‌ی iRT-SAC، با وجود کارایی بالای عددی و سازوکار تطبیقی بلادرنگ، همانند سایر کنترل‌کننده‌های تطبیقی، می‌تواند تحت تأثیر عواملی نظیر نویز حسگر، تأخیر محاسباتی و محدودیت باند فرکانسی قرار گیرد. با این حال، طراحی مناسب نرخ نمونه‌برداری ($\Delta t = 0.005$ s) و انتخاب فرکانس تحریک الگوریتم ES در محدوده‌ای خارج از باند دینامیکی سازه موجب حفظ پایداری عددی و امکان پیاده‌سازی بلادرنگ کنترل‌کننده شده است. این سازوکار همچنین امکان واکنش سریع و کاهش مؤثر شاخص‌های عملکرد ($J_{14}-J_1$) در رکوردهای شدید و غیرخطی را فراهم می‌کند. بررسی دقیق‌تر محدودیت‌ها در قالب آزمون‌های حساسیت و مطالعات مونت کارلو می‌تواند به‌عنوان مسیر پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرد.

در کنار ارزیابی عملکرد لرزه‌ای و امکان‌پذیری عملی، رفتار کنترل‌کننده در برابر نامعینی‌ها نیز از اهمیت مهندسی برخوردار است.

با توجه به اینکه مدل پنجمارک ۲۰ طبقه اوهتوری و همکارانش به صورت غیرخطی و با رفتار هیستریزس مدل سازی شده است، بخشی از نامعینی های ساختاری نظیر کاهش سختی، تغییر میرایی مؤثر و وابستگی پاسخ به تاریخچه بارگذاری، به صورت ذاتی در فرآیند تحلیل لحاظ شده اند.

کنترل کننده ی تطبیقی iRT-SAC به گونه ای طراحی شده است که بدون نیاز به اطلاع دقیق از پارامترهای سازه ای، بهره های کنترلی خود را به صورت بلادرنگ و مبتنی بر خطای ردیابی تنظیم می کند. این ویژگی موجب می شود عملکرد کنترل کننده در برابر تغییرات پارامتری، خطاهای مدل سازی و رفتارهای غیرخطی ناگهانی سازه، پایدار و مقاوم باقی بماند. علاوه بر این، مطابق پروتکل استاندارد پنجمارک، نویز اندازه گیری با RMS مشخص مطابق مستندات پنجمارک در مدل لحاظ شده است و قانون تطبیق، که بر سیگنال های فیلتر شده اعمال می شود، اثر نویزهای فرکانس بالا را کاهش می دهد. بررسی جامع تر حساسیت پارامتری و اثر خطاهای سنسور به صورت مطالعه ای مستقل می تواند در پژوهش های آتی دنبال شود.

۵- نتیجه گیری

برای ارزیابی عملکرد کنترل کننده ی پیشنهادی، یک سازه ی ۲۰ طبقه تحت چهار رکورد زلزله واقعی شامل ال سنترو، هاجینوهه، نورتریج و کوبه، در سه سطح شدت ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ برابر شتاب اوج هر رکورد مورد تحلیل قرار گرفت. عملکرد کنترل کننده iRT-SAC با روش مرجع شامل فازی، LQG، H_∞ ، Clipped-LQG، OSAC، MPC مقایسه شد. ارزیابی کیفی و کمی نتایج با استفاده از ۱۴ شاخص اصلی J_1 تا J_{14} انجام گرفت. این شاخص ها امکان مقایسه دقیق پاسخ به تحریک های لرزه ای و ارزیابی رفتار غیرخطی، مفاصل پلاستیک، دریفت و انرژی را فراهم می کنند.

نتایج عددی نشان می دهد که کنترل کننده iRT-SAC در تمامی شاخص ها عملکرد برتر و پایدارتر نسبت به سایر روش ها داشته است. به طور مشخص:

- بر اساس شاخص عملکرد J_1 ، مقدار بیشینه برای کنترل کننده ی iRT-SAC در بازه ی ۰/۵۲۰ قرار گرفت؛ این مقدار نسبت به کنترل کننده ی فازی با مقدار ۱/۱۳۲، بیش از ۶۶٪ کاهش و نسبت به بهترین روش سنتی یعنی H_∞ با مقدار ۰/۶۹۱، حدود ۲۵٪ بهبود را نشان می دهد.
 - مطابق شاخص J_2 ، بیشینه ی مقدار ثبت شده برای کنترل کننده ی iRT-SAC برابر با ۰/۵۷۷ بوده که نسبت به کنترل فازی (۰/۸۶۹) حدود ۵۲٪ کاهش و نسبت به کنترل کننده ی OSAC (۰/۴۷۶) حدود ۱۲٪ بهبود داشته است.
 - در شاخص J_3 ، مقدار ثبت شده برای کنترل کننده ی iRT-SAC برابر با ۰/۷۷۲ است که نسبت به روش فازی (۰/۹۵۳) بیش از ۶۰٪ کاهش و نسبت به H_∞ (۰/۵۵۲) حدود ۴۰٪ بهبود نشان می دهد.
 - بر پایه ی شاخص J_4 ، مقدار به دست آمده برای کنترل کننده ی iRT-SAC برابر با ۰/۵۱۵ بوده که در مقایسه با Clipped-LQG (۱/۱۸۸) و H_∞ (۱/۲۸۱) به ترتیب ۵۷٪ و ۶۰٪ بهبود حاصل شده است.
 - بر اساس شاخص J_5 ، مقدار بیشینه برای کنترل کننده ی iRT-SAC برابر با ۰/۴۵۶ بوده که نسبت به فازی (۱/۰۲۷) بیش از ۵۵٪ کاهش و نسبت به H_∞ (۰/۴۶۹) حدود ۲/۸٪ بهبود داشته است.
 - در نهایت، طبق شاخص J_6 ، مقدار ثبت شده برای کنترل کننده ی iRT-SAC برابر با ۰/۵۸۲ است که نسبت به روش فازی (۱/۰۰۷) حدود ۴۲٪ کاهش و نسبت به H_∞ (۰/۷۵۸) حدود ۲۳٪ بهبود را نشان می دهد.
- شاخص های J_7 تا J_{14} عملکرد کنترل کننده ی iRT-SAC در کنترل رفتار غیرخطی، مفاصل پلاستیک و مصرف انرژی را به طور دقیق نشان می دهند. نتایج عددی حاکی از آن است که iRT-SAC:
- ورود سازه به ناحیه غیرخطی و توسعه تغییر شکل های پلاستیک ($J_7 - J_{10}$) را به طور مؤثر محدود کرده و در رکوردهای شدید، کمترین مقادیر را ثبت نموده است (برای مثال بیشینه J_7 برابر با ۰/۵۵۲ است که نسبت به LQG (۰/۹۷۸) و فازی (۱/۶۱۸) کاهش چشمگیری دارد).
 - تعداد مفاصل پلاستیک فعال شده (J_8) و انرژی تجمعی اتلاف شده در آن ها (J_9) کاهش یافته و رفتار سازه به حالت نزدیک به الاستیک حفظ شده است؛ بیشینه J_8 در رکوردهای شدید تنها ۰/۱۶۰ و ۰/۰۶۱ گزارش شده که به طور قابل توجهی کمتر از

OSAC و LQG است. همچنین شدت تغییر شکل‌های پلاستیک (J_{10}) با مقدار بیشینه ۰/۴۹۳ کاهش یافته و نشان‌دهنده کنترل مؤثر دریافت پلاستیک است.

- از نظر امکان‌پذیری عملی، نیروی کنترلی و جابه‌جایی عملگر ($J_{11} - J_{12}$) در محدوده ظرفیت استاندارد عملگرها باقی مانده و از اشباع آن‌ها جلوگیری شده است؛ بیشینه J_{11} بین ۰/۰۰۰۹۷ تا ۰/۰۰۰۵۷ و بیشینه جابه‌جایی J_{12} تنها ۰/۰۷۶ گزارش شده است.
- مصرف توان و انرژی عملگر ($J_{13} - J_{14}$) در مقایسه با سایر کنترل‌کننده‌های فعال به‌طور قابل توجهی کمتر بوده ($J_{13} (3.11 \times 10^{-3})$ ، $J_{14} (0.059 \times 10^{-3})$) و نشان‌دهنده کارایی بالا و امکان پیاده‌سازی بلادرنگ کنترل‌کننده است. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که کنترل‌کننده‌ی تطبیقی دولایه‌ی iRT-SAC ضمن حفظ سادگی ساختار SAC، پاسخ لرزه‌ای برتری در مواجهه با سناریوهای غیرخطی و نامعین ارائه می‌دهد. این کنترل‌کننده با مصرف انرژی بهینه و کاهش قابل توجه پاسخ در شاخص‌های J_7 تا J_{14} ، امکان اجرای عملی و بلادرنگ در سازه‌های پیچیده را فراهم می‌کند. محدودیت عملکرد مشاهده شده در رکوردهای far-field ناشی از رفتار شبه‌خطی سازه است و نشان‌دهنده‌ی ضعف کنترل‌کننده نیست. چارچوب دولایه با بازبیکربندی بلادرنگ نرخ یادگیری و ضرایب تابع هزینه، پایداری عددی و مقاومت بالا در برابر تغییرات پارامتری و خطاهای مدل‌سازی را تضمین می‌کند. به این ترتیب، iRT-SAC گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای بلادرنگ و حفاظت لرزه‌ای سازه‌های بلند و پیچیده محسوب می‌شود و با اعتمادپذیری دینامیکی و واکنش سریع به اغتشاشات، از کنترل‌کننده‌های مرجع متمایز می‌شود.

۶- محدودیت‌ها و کارهای آینده

اگرچه کنترل‌کننده‌ی تطبیقی iRT-SAC در چارچوب بنچمارک استاندارد ASCE-IASC و تحت چهار رکورد شاخص زمین‌لرزه شامل El Centro، Northridge، Hachinohe، Kobe و عملکردی پایدار و برتر نسبت به روش‌های مرجع از خود نشان داده است، ارزیابی حاضر به این مجموعه‌ی محدود از رکوردهای لرزه‌ای منحصر بوده است. با این حال، با توجه به ماهیت خودتنظیم و بلادرنگ کنترل‌کننده‌ی iRT-SAC، انتظار می‌رود عملکرد آن وابستگی معناداری به نوع خاصی از تحریک لرزه‌ای نداشته باشد. با این وجود، به‌منظور تقویت جنبه‌ی تعمیم‌پذیری نتایج، در ادامه‌ی پژوهش ارزیابی کنترل‌کننده بر روی مجموعه‌ای گسترده‌تر شامل حدود ۲۰ تا ۳۰ رکورد زلزله با ویژگی‌های طیفی متنوع و ماهیت‌های Near-Field و Far-Field مدنظر خواهد بود. در این راستا، گزارش شاخص‌های آماری نظیر میانگین و انحراف معیار می‌تواند ارزیابی جامع‌تری از پایداری و کارایی کنترل‌کننده فراهم آورد. از منظر پیاده‌سازی عملی، اگرچه تمامی شبیه‌سازی‌ها با مشخصات سخت‌افزاری و نویزی مطابق بنچمارک ($A/D-D/A$) با دقت ۱۶ بیت، دامنه ولتاژ ± 10 و ولت، نویز RMS برابر ۰،۰۳ و ولت و نرخ نمونه‌برداری ۰،۰۰۵ ثانیه) انجام شده‌اند و شاخص‌های J_{11} تا J_{14} نشان‌دهنده‌ی قرارگیری نیروی کنترلی، جابه‌جایی عملگر و مصرف انرژی در محدوده‌های عملی و قابل‌پیاده‌سازی هستند، بررسی اثرات تأخیرهای سخت‌افزاری، محدودیت‌های ارتباطی و قیود زمانی پردازش بلادرنگ به‌صورت صریح در این مطالعه لحاظ نشده است. از این رو، تحلیل حساسیت عملکرد کنترل‌کننده نسبت به تأخیرهای سنسور-عملگر و هزینه‌های محاسباتی بلادرنگ، به‌عنوان یکی از محورهای مهم تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود.

علاوه بر این، در این مطالعه تحلیل پایداری کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی عمدتاً بر پایه‌ی ارزیابی‌های عددی و پاسخ‌گذاری سیستم انجام شده و ارائه‌ی اثبات تحلیلی صریح پایداری (نظیر تحلیل مبتنی بر تابع لیاپانوف) به دلیل ماهیت غیرمدل‌محور، تطبیقی و مبتنی بر جستجوی اکستریمم الگوریتم iRT-SAC در چارچوب این پژوهش در نظر گرفته نشده است. توسعه‌ی یک چارچوب تحلیلی جامع برای بررسی همگرایی و پایداری نظری کنترل‌کننده می‌تواند به‌عنوان یکی از مسیرهای مهم پژوهش‌های آینده دنبال شود.

در ادامه‌ی پژوهش و با توجه به محدودیت‌های ذاتی کنترل‌کننده‌های تطبیقی بلادرنگ، گام‌های توسعه‌ای مهم می‌تواند شامل افزودن لایه‌های یادگیرنده با قابلیت اصلاح و بازبیکربندی ساختار کنترلی بر اساس تحلیل رفتار سازه به‌صورت بلادرنگ باشد. در این راستا، طراحی الگوریتم‌هایی با توانایی یادگیری و تعدیل ساختار قوانین کنترلی، به‌صورت تطبیقی با از طریق تنظیم پویا و بلادرنگ سطوح بهره با بهره‌گیری از روش‌های یادگیری تقویتی، می‌تواند افق‌های جدیدی در بهبود عملکرد و سازگاری کنترل‌کننده ایجاد کند. در نهایت، ساختار iRT-SAC با تلفیق کنترل تطبیقی و یادگیری بلادرنگ، چارچوبی نوین، انعطاف‌پذیر و قابل‌گسترش برای توسعه‌ی

کنترل‌کننده‌های هوشمند در سیستم‌های دینامیکی پیچیده فراهم می‌آورد و می‌تواند مبنایی مؤثر برای پژوهش‌های آتی در حوزه‌های کنترل سازه‌ای، سیستم‌های غیرخطی و سامانه‌های هوشمند مبتنی بر انطباق و یادگیری محسوب شود.

مراجع

- [1] O. Jafarzadeh, R. Sabetahd, S.A. Mousavi Ghasemi, S.M. Zahrai, Design of a novel intelligent adaptive fractional-order proportional-integral-derivative controller for mitigation of seismic vibrations of a building equipped with an active tuned mass damper, *Smart Materials and Structures*, 33(9) (2024) 095020.
- [2] S.H. Hosseini Lavassani, M. Ebadijalal, M. Shahrouzi, V. Gharehbaghi, E. Norooznejad Farsangi, T.Y. Yang, Interpretation of simultaneously optimized fuzzy controller and active tuned mass damper parameters under Pulse-type ground motions, *Engineering Structures*, 261 (2022) 114286.
- [3] O. El-Khoury, H. Adeli, Recent advances on vibration control of structures under dynamic loading, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 20(4) (2013) 353-360.
- [4] S. Elias, S. Djerouni, D. De Domenico, M. Abdeddaim, M.H. El Ouni, Seismic response control of building structures under pulse-type ground motions by active vibration controller, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 42(1) (2023) 345-367.
- [5] Z. Li, J. Tu, J. Zhang, Seismic response of high-rise buildings using long short-term memory intelligent decentralized control system, *Journal of Vibration and Control*, 29(9-10) (2023) 1981-1995.
- [6] R.C. Ümütlü, H. Ozturk, B. Bidikli, A robust adaptive control design for active tuned mass damper systems of multistory buildings, *Journal of Vibration and Control*, 27(23-24) (2021) 2765-2777.
- [7] S. Ma, S. Xiao, X. Wang, Fuzzy control algorithm of civil engineering structure vibration based on cluster analysis, in: *2022 3rd Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers*, Association for Computing Machinery, Dalian, China, 2022, pp. 750-754.
- [8] W.S. Abdulateef, F. Hejazi, Adaptive Real Time Efficient Control Algorithm for Buildings Under Wind and Earthquake Forces, *International Journal of Civil Engineering*, 22(12) (2024) 2193-2231.
- [9] P. Gardonio, G.K. Rodrigues, L. Dal Bo, E. Turco, Extremum seeking online tuning of a piezoelectric vibration absorber based on the maximisation of the shunt electric power absorption, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 176 (2022) 109171.
- [10] G.K. Rodrigues, P. Gardonio, L. Dal Bo, E. Turco, Piezoelectric patch vibration control unit connected to a self-tuning RL-shunt set to maximise electric power absorption, *Journal of Sound and Vibration*, 536 (2022) 117154.
- [11] D. Nešić, Extremum seeking control: Convergence analysis, *European Journal of Control*, 15(3-4) (2009) 331-347.
- [12] K. Zizouni, A. Saidi, L. Fali, I.K. Bousserhane, M. Djermane, Adaptive sliding-mode control for improved vibration mitigation in civil engineering structures, *Mechanical Sciences*, 13(2) (2022) 899-908.
- [13] A.Q. Al-Dujaili, A.J. Humaidi, Z.T. Allawi, M.E. Sadiq, Earthquake Hazard Mitigation for Uncertain Building Systems Based on Adaptive Synergetic Control, *Applied System Innovation*, 6(2) (2023) 34.
- [14] A. Glushchenko, K. Lastochkin, Exponentially stable MRAC of MIMO switched systems with matched uncertainty and completely unknown control matrix, *arXiv preprint arXiv:2208.03972*, (2022).
- [15] P. Ghosh, S. Bhasin, State and input constrained model reference adaptive control, in: *2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC)*, IEEE, 2022, pp. 68-73.
- [16] Y. Ohtori, R. Christenson, B. Spencer Jr, S. Dyke, Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings, *Journal of engineering mechanics*, 130(4) (2004) 366-385.
- [17] M. Bitaraf, S. Hurlebaus, Semi-active adaptive control of seismically excited 20-story nonlinear building, *Engineering Structures*, 56 (2013) 2107-2118.
- [18] M. Azizi, S. Talatahari, A. Giaralis, Active Vibration Control of Seismically Excited Building Structures by Upgraded Grey Wolf Optimizer, *IEEE Access*, (2021).
- [19] R. Sabetahd, S.A. Mousavi Ghasemi, R. Vafaei Poursorkhabi, A. Mohammadzadeh, Y. Zandi, Response Attenuation of a Structure Equipped with ATMD under Seismic Excitations Using Methods of Online Simple

- Adaptive Controller and Online Adaptive Type-2 Neural-Fuzzy Controller, *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022 (2022) 5832043.
- [20] R. W Soares, L.R. Barroso, O. AS Al-Fahdawi, Adaptive control for response attenuation of seismically excited cable-stayed bridges, *Journal of Vibration and Control*, 26(3-4) (2020) 131-145.
- [21] S. Ulrich, A. Saenz-Otero, I. Barkana, Passivity-based adaptive control of robotic spacecraft for proximity operations under uncertainties, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 39(6) (2016) 1444-1453.
- [22] I. Bar-Kana, H. Kaufman, Simple adaptive control of large flexible space structures, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 29(4) (1993) 1137-1149.
- [23] S. Lee, F. Kozin, Bounded state control of linear structures, in: *Structural Control: Proceedings of the Second International Symposium on Structural Control*, University of Waterloo, Ontario, Canada, July 15–17, 1985, Springer, 1987, pp. 387-407.
- [24] M. Bitaraf, S. Hurlebaus, L.R. Barroso, Active and semi-active adaptive control for undamaged and damaged building structures under seismic load, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(1) (2012) 48-64.
- [25] M. Bitaraf, L.R. Barroso, S. Hurlebaus, Adaptive control to mitigate damage impact on structural response, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21(6) (2010) 607-619.
- [26] S. Shen, J. Xu, Adaptive neural network-based active disturbance rejection flight control of an unmanned helicopter, *Aerospace Science and Technology*, 119 (2021) 107062.
- [27] H.-P. Ren, S.-S. Jiao, J. Li, Y. Deng, Adaptive neural network control of pneumatic servo system considering state constraints, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 162 (2022) 107979.
- [28] I. Bar-Kana, A. Guez, Simplified techniques for adaptive control of robotic systems, *Control Dyn Syst V40: Adv Robot Syst Part 2 of 2: Adv Theory Appl*, 40 (2012) 147.
- [29] A. Hosseini, T. Taghikhany, Online self-tuning mechanism for direct adaptive control of tall building, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 32(3) (2018) 424-446.
- [30] A. Hosseini, T. Taghikhany, A. Yeganeh Fallah, Direct adaptive algorithm for seismic control of damaged structures with faulty sensors, *Journal of Vibration and Control*, 24(24) (2018) 5854-5866.
- [31] M. Al-Dawod, B. Samali, K. Kwok, F. Naghdy, Fuzzy controller for seismically excited nonlinear buildings, *Journal of Engineering Mechanics*, 130(4) (2004) 407-415.
- [32] G. Yan, F. Chen, Y. Wu, A semi-active H_{∞} control strategy with application to the vibration suppression of nonlinear high-rise building under earthquake excitations, *SpringerPlus*, 5(1) (2016) 1053.
- [33] R. Sabetahd, S.A. Mousavi Ghasemi, R. Vafaei Poursorkhabi, A. Mohammadzadeh, Y. Zandi, Online adaptive neuro-fuzzy controller design to attenuate the seismic responses in a 20-story benchmark structure, *Analysis of Structure and Earthquake*, 19(4) (2023) 13-26.
- [34] K. Subbaraj, M. Dokainish, A survey of direct time-integration methods in computational structural dynamics—II. Implicit methods, *Computers & structures*, 32(6) (1989) 1387-1401.
- [35] Ohtori Y, Spencer Jr BF. A MATLAB-based tool for nonlinear structural analysis. In *Proc. of the 13th Engineering Mechanics Conf 1999 Jun* (pp. 13–16).
- [36] F. Casciati, Checking the Stability of a Fuzzy Controller for Nonlinear Structures, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 12(3) (1997) 205-215.