

کنترل نیمه فعال سازه‌های مجاور سه و نه طبقه با کمک الگوریتم‌های فازی

نوع ۱ و ۲

سید مهدی زهرائی*
 استاد دانشکده مهندسی عمران
 دانشگاه تهران
 mzahrai@ut.ac.ir

محسن بهمنی
 دانش‌آموخته مهندسی سازه
 دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران
 mohsen.bahmaee@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۶

چکیده

استفاده از روش‌های کنترلی جهت کاهش ارتعاشات لرزه‌ای ناشی از بارهای دینامیکی از زمینه‌های تحقیقاتی فعال در سال‌های اخیر بوده است. خرابی‌های ناشی از برخورد ساختمان‌های مجاور در زلزله‌های بزرگ، اهمیت بهسازی و کاهش پاسخ سازه‌ها در برابر این بارها را آشکار می‌سازد. در این مطالعه، جهت بررسی عملکرد میراگر سیال مغناطیسی با استفاده از سامانه‌های کنترل فازی نوع ۱ و ۲، سازه‌های معیار سه و نه طبقه تحت تحریک‌های لرزه‌ای با بیشینه شتاب‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند. میراگر سیال مغناطیسی مورد استفاده در این مطالعه در تراز طبقه سوم، دو سازه را به یکدیگر متصل می‌کند و توانایی تولید نیروی کنترلی معادل ۱۰۰۰ کیلو نیوتن را دارد. ولتاژ اعمالی به میراگر در هر لحظه توسط سامانه کنترلی طراحی شده براساس مقدار جابه‌جایی دو سازه به‌عنوان ورودی سامانه محاسبه می‌شود. در این مطالعه، رویکرد کلی کنترل فازی با هدف کاهش احتمال برخورد سازه‌ها و کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای دو سازه است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، عملکرد کنترل فازی نوع ۲ که عدم قطعیت‌ها را در خود جای می‌دهد، در مقایسه با فازی نوع ۱ بهتر بوده است. خطر برخورد سازه‌ها با استفاده از کنترل‌های فازی نوع ۱ و ۲ به ترتیب ۳۷/۵ و ۳۹/۷ درصد کاهش یافته است. علاوه بر این، سامانه‌های فازی عملکرد مناسبی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها داشته‌اند. به‌عنوان مثال کنترل فازی نوع ۱ و ۲ قادر بوده‌اند که مقادیر حداکثر جابه‌جایی، شتاب و برش پایه در سازه سه طبقه را به ترتیب ۲۲/۶، ۸، ۱۳/۵ و ۷/۵، ۱۳/۹ درصد کاهش دهند.

واژگان کلیدی: کنترل ارتعاشات، کنترل نیمه‌فعال، میراگر سیال مغناطیسی، کنترل فازی نوع ۱ و نوع ۲، سازه‌های مجاور

۱. مقدمه

نظریه مجموعه‌های فازی برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط لطفی‌زاده معرفی شد [۱]. در سال ۱۹۷۴، ممدنی^۱ با استفاده از نظریه‌های رویکرد زبانی و استنتاج فازی معرفی شده توسط لطفی‌زاده، با موفقیت از قانون اگر-آنگاه در کنترل خودکار یک مولد بخار استفاده کرد. نتایج تحقیق ممدنی ثابت کرد که این رویکرد کنترلی همانند کنترل‌کننده‌های کلاسیک مؤثر بوده و با توجه به سادگی در اجرا، می‌توان در مسائل مختلف از آن بهره برد. مهم‌ترین مزیت استفاده از کنترل‌کننده فازی، عدم وابستگی آن به تجزیه و تحلیل مدل‌های ریاضی است.

بنابراین، با عدم قطعیت داده‌های ورودی از بارگذاری‌های خارجی و همچنین حسگرهای نصب شده روی سازه، با یک رویکرد ساده‌تر نسبت به کنترل‌کننده‌های کلاسیک مواجهه می‌شود. علاوه بر این، برای بررسی‌های واقع‌بینانه‌تر می‌توان بر مشکلات ناشی از در نظر گرفتن محدوده‌های غیرخطی نیز به-راحتی چیره شد و با به‌کارگیری مهارت انسانی در تعیین قوانین فازی، می‌توان سامانه‌های سازه‌ای پیچیده را نیز کنترل کرد [۲].

محققان زیادی از جمله براون^۲ و یائو^۳ در دهه ۷۰ و ۸۰ میلادی، با انجام تحقیقات گسترده، کاربرد مجموعه‌های فازی در مهندسی سازه را بررسی کردند. براون و یائو در سال ۱۹۸۳ در مشاهدات تجربی خود در تست‌های خستگی، با این مسئله روبه‌رو شدند که حتی با وجود تشخیص مکان دقیق ترک‌ها روی یک نمونه ورق فولادی و دنبال کردن رشد ترک‌ها، مشاهده شد که ورق فولادی نه در مکان ترک‌های شکل گرفته بلکه در مکان غیرمنتظره دیگری دچار شکست شد. این تجربه نشان داد که حتی با تشخیص دقیق ترک‌ها، همچنان ارزیابی خرابی ساده‌ترین عضو سازه‌ای نیز کار دشواری است [۳]. بتانی^۴ و همکاران [۴] در سال ۱۹۹۸ در ادامه تحقیقات گذشته خود، روی استفاده از میراگر جرمی فعال در کنترل ارتعاشات متمرکز شدند. در این مطالعه دو سامانه کنترلی که در هر کدام سه و پنج تابع عضویت برای هر ورودی در نظر

گرفته شده بود، استفاده شد. نتایج این تحقیق، رویکرد کنترل فازی را به‌عنوان یک روش مناسب کنترل برای کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ای با میراگر جرمی فعال نشان داد. چوی^۵ و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۴ یک استراتژی کنترل نیمه‌فعال فازی برای کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای با استفاده از میراگر سیال مغناطیسی ارائه دادند. از یک قاب برشی سه طبقه در این مطالعه استفاده شد و کنترل غیرفعال و همچنین کنترل بهینه برشی^۶ (در این حالت، ولتاژ روی مقادیر صفر و حداکثر تنظیم شد) برای مقایسه با کنترل فازی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که سامانه کنترلی ارائه شده که ترکیبی از کنترل‌کننده فازی و میراگر سیال مغناطیسی بود در کاهش ارتعاشات سازه در مقایسه با دیگر حالت‌های بررسی شده مؤثرتر بوده است.

یان^۷ و ژو^۸ [۶] در سال ۲۰۰۶ براساس الگوریتم ژنتیک و برای جلوگیری از خرابی‌های ناشی از بارگذاری‌های لرزه‌ای نظیر زلزله، یک استراتژی بهینه برای کنترل نیمه‌فعال فازی سازه‌های مجهز به میراگر سیال مغناطیسی ارائه دادند. نتایج این بررسی نشان داد که ساختار فازی-ژنتیک مورد استفاده به‌خوبی ارتباط فازی میان ورودی و خروجی کنترل‌کننده را برقرار می‌کند و با توجه به عملکرد بهینه آن، جابه‌جایی و شتاب سازه را به‌طور هم‌زمان کاهش می‌دهد. داس^۹ و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۲ براساس فازی‌سازی مشخصات میراگر سیال مغناطیسی، یک الگوریتم کنترل فازی ارائه دادند. الگوریتم پیشنهادی دارای ساختار برگشتی بوده و با استفاده از جعبه ابزار فازی و سیمولینک متلب^{۱۰} پیاده‌سازی شد. از دو سازه سه و ده طبقه برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که روش پیشنهادی همانند کنترل بهینه برشی پاسخ‌های لرزه‌ای را کاهش می‌دهد درحالی‌که ولتاژ اعمالی و نیروی کنترلی کمتری ایجاد می‌کند. همچنین مشاهده شد که محل قرارگیری میراگرها روی عملکرد سامانه کنترلی بسیار مؤثر است و افزایش ظرفیت تولید نیروی میراگر بعد از مقدار مشخصی، عملکرد کنترل‌کننده را بهتر نمی‌کند.

آرساوا^{۱۱} و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۵، برای اولین بار استفاده از کنترل فازی برای کاهش خطر بارهای ضربه‌ای سازه‌های بتن مسلح را بررسی کردند. مدل پیشنهادی محققان، جنبه‌های مختلف شامل شبکه‌های عصبی، تأخیر زمانی و نظریه منطق فازی را برای کاهش خطر ضربه‌ای سازه‌ها ترکیب می‌کند. پاسخ‌های سازه‌ای سامانه مورد نظر با حالت کنترل نشده، حالت کنترل غیرفعال و همچنین کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی^{۱۲} مقایسه شدند. با بررسی نتایج تحقیق مشاهده شد که سامانه فازی پیشنهادی در کاهش پاسخ‌ها مؤثر بوده و با افزایش نیروی ضربه‌ای، به مقدار قابل توجهی بهبود می‌بخشد. به عنوان مثال، پس از ۱۰۰ میلی‌متر افت ارتفاع، کنترل کننده فازی از استراتژی‌های تناسبی-انتگرالی-مشتقی و کنترل غیرفعال بهتر عمل می‌کند. یانگ^{۱۳} و کای^{۱۴} [۹] در سال ۲۰۱۵ برای کاهش ارتعاش طولی بیش از حد یک پل معلق ناشی از نیروهای ترمز وسایل نقلیه عبوری و همچنین تحریک زلزله، یک سامانه کنترل فازی ارائه دادند. به عنوان یک مورد مطالعاتی، پل پینگ‌سنگ^{۱۵} در کشور چین استفاده شد. یک مدل المان محدود سه بعدی از پل به همراه هشت میراگر سیال مغناطیسی در نظر گرفته شد. با مقایسه جامع میزان کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای و مصرف انرژی میراگرهای سیال مغناطیسی، کنترل فازی نیمه‌فعال، بهترین عملکرد را بین سامانه‌های بررسی شده نشان داد. نتایج تحقیق نشان داد که نیروهای ترمز وسایل نقلیه و تحریک زلزله‌ها به خوبی توسط سامانه پیشنهادی تشخیص داده می‌شوند و سامانه کنترلی پیشنهادی مؤثر و قابل اطمینان است.

کنترل کننده‌های منطق فازی نوع ۱ در موارد بسیار زیادی با موفقیت اجرا شده است. با این حال برای کاربردهای زیادی در دنیای واقعی نیاز است که با عدم قطعیت‌های بیشتری مواجهه کرد که سامانه‌های مرسوم فازی نوع ۱ چنین قابلیت‌هایی برای در نظر گرفتن این مقدار از عدم قطعیت‌ها ندارند. یک کنترل کننده فازی نوع ۲ که از مجموعه‌های فازی نوع ۲ استفاده می‌کند، در مواجهه با چنین عدم قطعیت‌هایی، عملکرد

بهتری خواهد داشت. بنابراین، کنترل کننده‌های فازی نوع ۲ پتانسیل چیره شدن بر محدودیت‌های کنترل کننده فازی نوع ۱ را دارند و نسل جدیدی از کنترل فازی با عملکردی بهتر را معرفی می‌کنند.

هاگراس در سال ۲۰۰۷، جهت ارزیابی عملکرد در لحظه کنترل فازی نوع ۲ و چگونگی کارکرد آن در مواجهه با مقادیر بالای عدم قطعیت‌ها و تغییرات شرایط آب و هوایی، آزمایشاتی را در شرایط محیطی مختلف (مثل باران، باد، تابش خورشید و ...) روی سطوح مختلف زمین (مانند زمین‌های لغزنده و خشک) و در ساعات مختلف روز به وسیله ربات‌ها انجام داد. این آزمایشات نشان داد که در شرایط مشخص محیط، زمین و ربات، کنترل فازی نوع ۱ پاسخ‌های خوبی می‌دهد ولی در صورت اعمال تغییرات در هر کدام از شرایط ذکر شده، کنترل فازی نوع ۲ در شرایط مختلف، پاسخ‌های بهتری را ارائه نموده است [۱۰].

جامه^{۱۶} و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۹ استفاده از کنترل فازی نوع ۲ را برای کنترل ازدحام شبکه مورد بررسی قرار دادند. محققان در این مطالعه نشان دادند که کنترل فازی نوع ۲ علاوه بر اینکه تمامی قابلیت‌های کنترل فازی نوع ۱ را در خود جای می‌دهد، عدم قطعیت‌هایی که بازخوردهای اصلی به کنترل کننده را تشکیل می‌دهند را نیز در نظر می‌گیرد. در واقع، کنترل فازی انحرافات قابل توجه در ورودی سامانه را به خوبی پاسخ می‌دهد. همچنین مشخص شد که کنترل کننده فازی نوع ۲ در مقایسه با کنترل کننده فازی نوع ۱ و سایر کنترل کننده‌های مورد استفاده، در هنگام وجود اختلال جزئی در ورودی‌های سامانه کنترل (که برای کیفیت ویدئو دریافتی و در نتیجه رضایت کاربران حائز اهمیت است) عملکرد مناسب‌تری دارد.

بطهایی و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۷ عملکرد میراگر جرمی نیمه‌فعال با استفاده از کنترل کننده‌های فازی نوع ۱ و نوع ۲ را برای کاهش ارتعاشات یک قاب ۱۱ طبقه بررسی کردند. در این تحقیق، تحلیل دینامیکی افزاینده^{۱۷} از ده رکورد زلزله با حداکثر

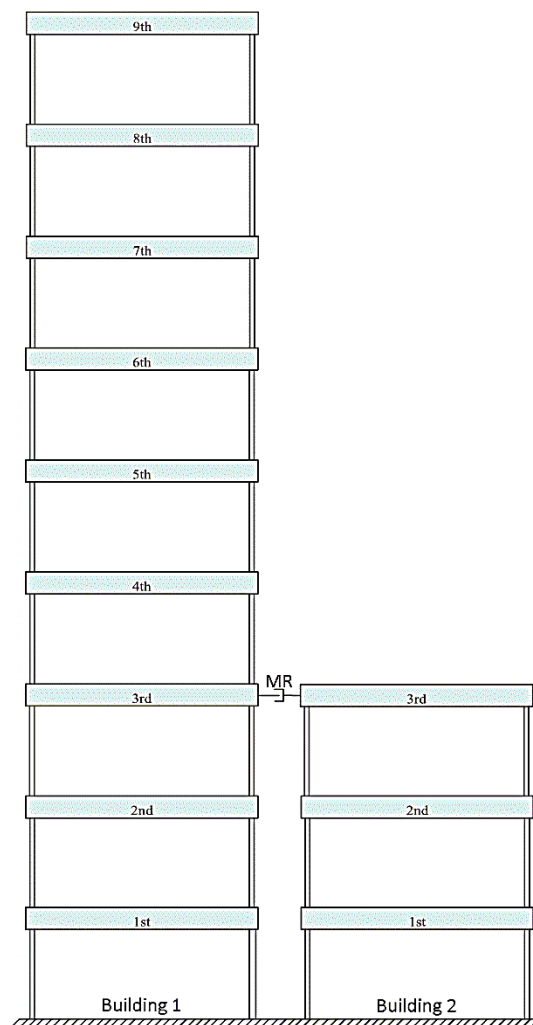
شتاب‌های ۰/۱ تا ۱ برابر شتاب زمین به‌عنوان محرک لرزه‌ای سازه مورد استفاده قرار گرفت و نتایج تحقیق نشان داد که کنترل فاززی نوع ۲ عملکرد مناسب‌تری نسبت به فاززی نوع ۱ در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه دارد. به‌عنوان مثال کنترل فاززی نوع ۲ به‌طور میانگین، حداکثر جابه‌جایی، شتاب و برش پایه سازه را به‌ترتیب ۱۱/۷، ۱۴ و ۱۱/۲ درصد کاهش داد. پل^{۱۸} و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۷ استفاده از کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی فاززی نوع ۲ جهت جبران عدم‌قطعیت‌های موجود در کنترل سازه‌ها با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده و تحریک‌کننده پیش‌جسی را بررسی کردند. از یک سازه نمونه دو طبقه در آزمایشگاه برای بررسی کارایی سامانه پیشنهادی استفاده شد که نتایج آزمایشگاهی در تایید بررسی عددی آنها نشان داد که کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی فاززی نوع ۲ برای تحریک افقی سازه و همچنین تحریک پیش‌جسی سازه عملکرد مناسب‌تری نسبت به کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی دارد. هاشمی و زهرائی [۱۴] در سال ۲۰۱۷ با به‌کارگیری الگوریتم‌های کنترلی فاززی نوع ۱ و نوع ۲، استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده نیمه‌فعال را در سازه‌های غیرخطی معیار سه، نه و بیست طبقه تحت تحلیل دینامیکی افزایش یافته بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که به‌دلیل در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در الگوریتم فاززی نوع ۲، این سامانه کنترلی نسبت به فاززی نوع ۱ و همچنین کنترل غیرفعال عملکرد بهتری در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه از خود نشان می‌دهد.

اکثر محققان از کنترل‌کننده‌های فاززی نوع ۱ برای تولید نیروی کنترل نیمه‌فعال توسط میراگرهای سیال مغناطیسی استفاده کرده‌اند. این کنترل‌کننده‌ها، در شرایط محدودی کار می‌کنند و نمی‌توانند عدم قطعیت‌های مربوط به داده‌های ورودی، نوفه، تاخیر زمانی و توابع عضویت را در نظر بگیرند درحالی‌که

کنترل‌کننده‌های فاززی نوع ۲ از توابع عضویت به‌صورت بازه‌ای استفاده می‌کنند که عدم قطعیت‌ها را در خود جای می‌دهند. در این مطالعه، جهت بررسی عملکرد میراگر سیال مغناطیسی با استفاده از کنترل فاززی نوع ۱ و نوع ۲، سازه‌های معیار سه و نه طبقه تحت تحریک لرزه‌ای زلزله‌های حوزه دور و نزدیک با بیشینه شتاب‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند.

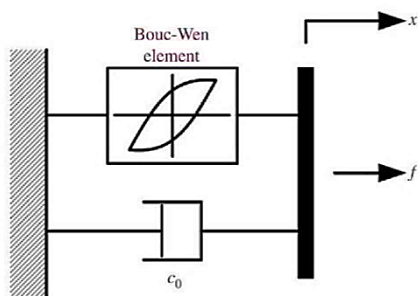
۲. شبیه‌سازی عددی

سازه‌های معیار سه و نه طبقه طراحی شده در پروژه SAC به‌عنوان مورد مطالعاتی در این تحقیق استفاده شده‌اند [۱۵]. در شکل ۱ شماتیکی از دو سازه مجاور که در تراز طبقه سوم به یکدیگر متصل شده‌اند نشان داده شده است. مدل‌سازی و همچنین انجام تحلیل‌های دینامیکی فزاینده دو سازه مورد استفاده که دوره تناوب آنها ۱/۰۱ و ۲/۲۷ ثانیه است، در نرم‌افزار اجزا محدود اپنسیس^{۱۹} صورت گرفته است. جهت شبیه‌سازی کنترل فاززی از نرم‌افزار متلب به‌صورت لینک شده استفاده شده است. همان‌گونه که در ادامه توضیح داده خواهد شد، کنترل ارتعاش سازه‌ها در لحظه انجام می‌گیرد و کنترل عملکرد میراگر سیال مغناطیسی به‌صورت نیمه‌فعال است. جابه‌جایی دو سازه که در پایان انجام هر گام از تحلیل دینامیکی از نرم‌افزار اپنسیس به‌دست می‌آید به‌عنوان ورودی کنترل فاززی در نرم‌افزار متلب استفاده می‌شود. کنترل فاززی با توجه به توابع عضویت و قوانین فاززی که از قبل در طراحی سامانه کنترلی تعیین شده‌اند، ولتاژ اعمالی به میراگر را محاسبه می‌کند که این ولتاژ به کمک مدل بوک-ون^{۲۰} به نیروی کنترلی تبدیل می‌شود. نیروی به‌دست آمده از طریق نرم‌افزار اپنسیس به مدل سازه‌ها اعمال شده و تحلیل یک گام به جلو برده می‌شود.



شکل ۱. مدل سازه‌های مجاور متصل شده با میراگر سیال مغناطیسی

المان بوک-ون که به موازات یک میراگر ویسکوز قرار می‌گیرد تشکیل می‌شود.



شکل ۲. مدل بوک-ون برای میراگر سیال مغناطیسی [۱۶]

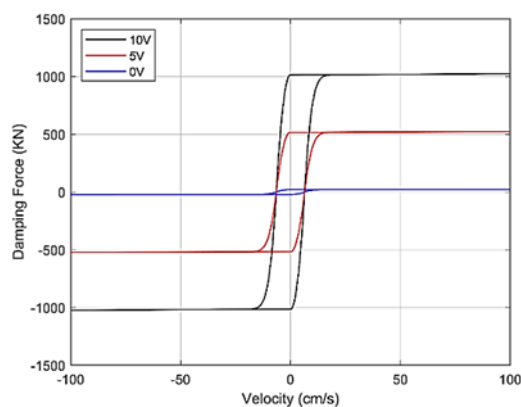
نیروی f تولید شده توسط میراگر سیال مغناطیسی براساس مدل بوک-ون از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد.

جهت بهره‌مندی از ویژگی‌های مطلوب میراگر سیال مغناطیسی از جمله در نظر گرفتن رفتار غیرخطی آن لازم است از مدل دینامیکی مناسبی که قابلیت پیش‌بینی دقیق رفتار میراگر در محدوده وسیعی از ورودی‌ها را داشته باشد، استفاده نمود. در سالیان اخیر مدل‌های زیادی برپایه معادلات ریاضی و همچنین برپایه الگوریتم‌های هوشمند معرفی شده است که مدل بوک-ون به علت توانایی بالا جهت شبیه‌سازی رفتار دینامیکی در عین سادگی توسط بسیاری از محققان به‌عنوان مدل دینامیکی میراگر سیال مغناطیسی مورد استفاده قرار گرفته است و در این تحقیق نیز به کار گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، این مدل از یک

مدل مورد استفاده برای میراگر به درستی نیروی متناسب با ولتاژ ورودی و سرعت میراگر را به دست می‌آورد.

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در مدل میراگر سیال مغناطیسی

α_a = 1.0872e5 N/cm	c_{0a} = 4.40 N s/cm	γ = 3 cm ⁻¹
α_b = 4.9616e5 N/(cm V)	$n = 1$	β = 3 cm ⁻¹
c_{0b} = 44.0 N s/(cm V)	$A = 1.2$	η = 50 s ⁻¹



شکل ۳. نمودار رفتاری میراگر سیال مغناطیسی

۳. سامانه‌های کنترل نیمه‌فعال

سامانه‌های منطق فازی به طور گسترده برای کنترل، شناسایی سامانه، مشکلات تشخیص الگو و بسیاری از برنامه‌های کاربردی دیگر از صنعت تا دانشگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند. سامانه‌های کنترل فازی توانایی بالایی در مواجهه با عدم قطعیت‌های موجود در مسئله مورد بحث را دارند و از جمله سامانه‌های هوشمندی هستند که به یک مدل ریاضی دقیق از سازه وابسته نیستند و می‌توانند رفتار غیرخطی سازه را به خوبی در نظر بگیرند. کنترل فازی از سه بخش کلی فازی‌سازی^{۲۳}، استنتاج فازی^{۲۴} و تفکیک فازی^{۲۵} تشکیل می‌شود. در بخش فازی‌سازی، مقادیر ورودی که توسط سنسورها و به‌عنوان

$$f = c_0 \dot{x} + \alpha z \quad (۱)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}|z|\dot{z}|^{n-1} - \beta \dot{x}|z|^n + A\dot{x} \quad (۲)$$

در روابط بالا، x و \dot{x} به ترتیب جابه‌جایی و سرعت میراگر سیال مغناطیسی و z متغیر تکاملی^{۲۱} است که در واقع وابستگی تاریخیچه پاسخ‌ها را در نظر می‌گیرد. با افزودن پارامترهای γ ، β ، n و A به مدل، می‌توان رفتار خطی باربرداری و انتقال از ناحیه تسلیم نشده به تسلیم شده را در نظر گرفت. همچنین α و c_0 ضرایبی هستند که وابستگی عملکردی پارامترهای میراگر به ولتاژ مؤثر u را در نظر می‌گیرند و در روابط ۳ و ۴ تعریف شده‌اند.

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (۳)$$

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \quad (۴)$$

در رابطه ۳ و ۴، α_a ، α_b ، c_{0a} و c_{0b} ضرایبی ثابت مربوط به میراگر سیال مغناطیسی مورد استفاده می‌باشند. علاوه بر این، به علت عدم توانایی میراگر در مطابقت آنی با ولتاژ اعمالی، برای محاسبه تأخیر زمانی در پاسخ میراگر به تغییرات ورودی، رابطه ۵ در نظر گرفته می‌شود.

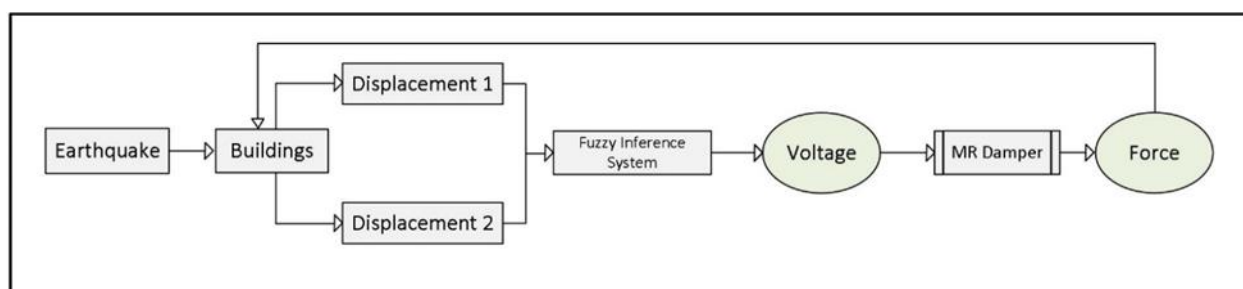
$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (۵)$$

در رابطه بالا، v و η به ترتیب ولتاژ اعمالی به سامانه کنترلی و ثابت زمانی هستند. با توجه به پارامترهای میراگر مورد استفاده در این تحقیق، این میراگر توانایی اعمال نیروی ۱۰۰۰ کیلو نیوتن را دارد و ولتاژ دریافتی آن مقداری بین ۰ و ۱۰ ولت است. در جدول ۱ مقادیر مورد استفاده برای هر پارامتر مدل بوک-ون نشان داده شده است [۱۶].

در این مطالعه از رفتار میراگر شبیه‌سازی شده در مطالعه اک^{۲۲} و همکاران [۱۶] برای صحت‌سنجی مدل بوک-ون استفاده شده است که در شکل ۳ رفتار چرخه‌ای میراگر تحت ولتاژهای صفر، ۵ و ۱۰ ولت نشان داده شده است. با مقایسه این نمودار با نمودار مشابه در تحقیق اک و همکاران مشاهده می‌شود که

ورودی سامانه هستند، با توجه به توابع عضویت^{۲۶} تعریف شده توسط طراح کنترل فازی به مقادیر زبانی فازی تبدیل می‌شوند. در این مرحله درجه عضویت مجموعه‌های فازی مشخص می‌شود و در مرحله بعد که در واقع مهم‌ترین بخش کنترل فازی است، برپایه قوانین فازی که برای مجموعه‌های فازی در نظر گرفته شده است، مقدار خروجی کنترل فازی تصمیم‌گیری می‌شود. به‌عنوان گام آخر در مرحله تفکیک فازی، مقادیر زبانی فازی با توجه به توابع عضویت در نظر گرفته شده برای خروجی به مقادیر عددی تبدیل می‌شوند. توابع عضویت و قوانین فازی، مهم‌ترین پارامترها در عملکرد کنترل فازی هستند.

در این مطالعه میراگر سیال مغناطیسی در تراز طبقه بام سازه کوچک‌تر، دو سازه را به یکدیگر متصل می‌کند و عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، جابه‌جایی طبقه سوم دو سازه به‌عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده و خروجی براساس قوانین تعریف شده در استنتاج فازی تعیین می‌شود. در واقع خروجی کنترل فازی، ولتاژ ورودی مورد نیاز برای میراگر سیال مغناطیسی جهت تولید نیروی کنترل است. نیروی میراگر سیال مغناطیسی با اعمال ولتاژ بر روی آن کنترل می‌شود. نیروی به‌دست آمده در هر گام از تحلیل لرزه‌ای به سازه‌ها اعمال شده و این حلقه تا اتمام تحلیل لرزه‌ای ادامه می‌یابد.



شکل ۴. روند کلی انجام تحلیل‌های کنترل نیمه‌فعال فازی

از آنجایی که ارتعاشات در خلاف جهت دو سازه مجاور، علت اصلی رخداد پدیده برخورد است، قوانین فازی اگر-آنگاه^{۲۷} در این مطالعه به‌گونه‌ای تعریف شده‌اند که دو سازه ارتعاش همسان با یکدیگر داشته باشند. عملکرد کنترل فازی به این صورت خواهد بود که اگر دو سازه ارتعاش غیرهمسان داشته باشند که در این حالت احتمال برخورد دو سازه بیشتر می‌شود، مقدار ولتاژ بالایی را به میراگر اعمال می‌کند و اگر دو سازه ارتعاش همسان داشته باشند که حالت مطلوب در کنترل ارتعاش سازه‌های مجاور است، مقدار ولتاژ اعمالی عدد کوچکی خواهد بود. قوانین فازی مورد استفاده در این تحقیق که در جدول ۲ نشان داده شده‌اند، از مطالعه عبددایم^{۲۸} و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۶

اقتباس شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود متغیرهای ورودی کنترل فازی که با Displacement 1 و Displacement 2 در جدول ۲ مشخص شده‌اند، مقادیر جابه‌جایی طبقه سوم دو سازه هستند. در الگوریتم فازی، هفت مجموعه فازی برای متغیر ورودی با نام‌های اختصاری PL، PM، PS، ZE، NS، NM، NL و شش مجموعه فازی برای متغیر خروجی با نام‌های اختصاری VL، L، M، S، VS، ZE در نظر گرفته شده است که متغیرهای زبانی مربوط به مجموعه‌های ورودی و خروجی به‌ترتیب در جدول ۳ و جدول ۴ ارائه شده است. منظور از P و N در متغیرهای ورودی، مقادیر مثبت و منفی جابه‌جایی هستند.

جدول ۲. قوانین استنتاجی فازی برای کنترل فازی

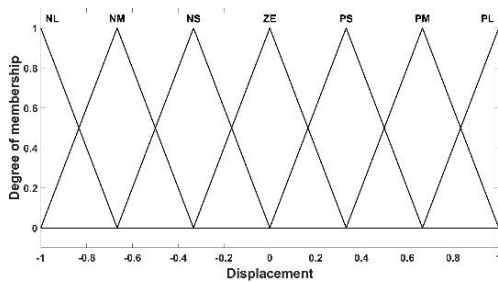
		Displacement 2						
		NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
Displacement 1	NL	ZE	VS	S	M	L	VL	VL
	NM	VS	S	S	M	L	L	VL
	NS	S	S	S	M	M	M	L
	ZE	M	M	M	ZE	M	M	M
	PS	L	M	M	M	S	S	S
	PM	VL	L	L	M	S	S	VS
	PL	VL	VL	L	M	S	VS	ZE

جدول ۳. توصیف مجموعه‌های فازی برای متغیر ورودی کنترل فازی

متغیر زبانی فازی	PL	PM	PS	ZE	NS	NM	NL
جابه‌جایی	مقادیر مثبت بزرگ	مقادیر مثبت متوسط	مقادیر مثبت کوچک	صفر	مقادیر منفی کوچک	مقادیر منفی متوسط	مقادیر منفی بزرگ

جدول ۴. توصیف مجموعه‌های فازی برای متغیر خروجی کنترل فازی

متغیر زبانی فازی	VL	L	M	S	VS	ZE
ولتاژ	مقادیر بسیار بزرگ	مقادیر بزرگ	مقادیر متوسط	مقادیر کوچک	مقادیر خیلی کوچک	صفر



شکل ۵. جزئیات مربوط به متغیر ورودی کنترل فازی نوع ۱

در شکل ۵ و ۶، جزئیات مربوط به متغیرهای ورودی و خروجی کنترل فازی نوع ۱ به ترتیب نشان داده شده است. مقدار درجه عضویت مجموعه‌های فازی برای هر ورودی از طریق توابع عضویت تعریف شده مشخص می‌شود. همچنین جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها از کنترل فازی نوع ۲ نیز استفاده شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در کنترل فازی نوع ۲ توابع عضویت به صورت بازه‌ای تعریف شده‌اند.

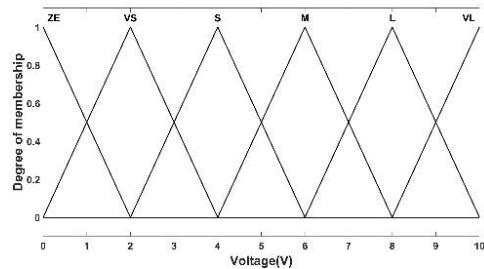
۴. بررسی نتایج عددی

جهت ارزیابی عملکرد کنترل فازی نوع ۱ و نوع ۲ تحت تحریک‌های لرزه‌ای مختلف، دو سازه تحت تحریک زلزله‌های حوزه دور و نزدیک قرار گرفته‌اند که مشخصات مربوط به آنها در جدول ۵ نشان داده شده است.

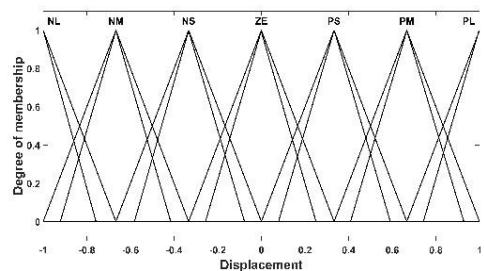
عملکرد سامانه‌های کنترلی در مقایسه با حالت کنترل نشده از نظر مقادیر شتاب، جابه‌جایی، برش پایه، تغییر مکان جانبی و همچنین احتمال رخداد پدیده برخورد سازه‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است که مشخصات معیارهای ارزیابی عنوان شده در جدول ۶ آورده شده است. در جدول ۶ برای حالت کنترل شده و کنترل نشده به ترتیب از اندیس‌های c و un استفاده شده است.

جدول ۶. معیارهای ارزیابی بیشینه پاسخها

critterion	equation	title
J_1	$\frac{\max x_c(t) }{\max x_{un}(t) }$	Displacement of roof story
J_2	$\frac{\max \ddot{x}_c(t) }{\max \ddot{x}_{un}(t) }$	Acceleration of 9th story
J_3	$\frac{\max V_c(t) }{\max V_{un}(t) }$	Base shear of structure
J_4	$\frac{\max d_c(t) }{\max d_{un}(t) }$	Relative displacement of structure
J_5	$\frac{\max \Delta_c(t)}{\max \Delta_{un}(t)}$	Minimum required gap



شکل ۶. جزئیات مربوط به متغیر خروجی کنترل فازی نوع ۱



شکل ۷. جزئیات مربوط به متغیر ورودی کنترل فازی نوع ۲

جدول ۵. جزئیات رکورد زلزله‌های استفاده شده در تحلیل‌های

تاریخچه زمانی

Earthquake	Type	Station	PGA (g)
El Centro	Far-field	El Centro Array #9	0.28
Kern County	Far-field	Taft Lincoln School	0.18
Kobe	Near-field	KJMA	0.83
Northridge	Near-field	Sylmar - Olive	0.84

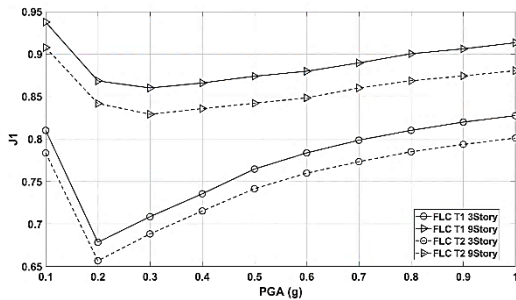
جدول ۷. حداکثر پاسخ جابه‌جایی طبقه بام سازه سه طبقه برای سامانه‌های مختلف کنترل تحت تحریک زلزله

PGA(g)	Peak response of displacement (cm)			Improvement percentage (%)	
	Uncontrolled	FLC T1	FLC T2	FLC T1	FLC T2
El Centro					
0.1	4.05	2.86	2.70	29.50	33.45
0.2	8.08	3.99	3.82	50.61	52.70
0.3	12.11	7.15	6.76	40.99	44.17
0.4	16.15	10.61	10.06	34.30	37.69
0.5	20.18	14.24	13.52	29.40	33.01
0.6	24.20	17.90	17.02	26.03	29.70
0.7	28.23	21.59	20.51	23.52	27.35
0.8	32.26	25.33	24.06	21.48	25.42
0.9	36.28	29.10	27.60	19.79	23.94
1	40.30	32.81	31.15	18.60	22.71
Kern County					
0.1	3.95	3.10	2.94	21.63	25.55
0.2	7.87	5.40	5.15	31.38	34.57
0.3	11.79	7.21	6.83	38.86	42.09
0.4	15.70	9.35	9.04	40.47	42.43
0.5	19.62	12.31	11.89	37.25	39.41
0.6	23.53	15.28	14.74	35.05	37.35
0.7	27.44	18.27	17.61	33.42	35.82
0.8	31.34	21.25	20.48	32.21	34.65
0.9	35.25	24.25	23.36	31.20	33.73
1	39.14	27.25	26.23	30.38	32.99
Kobe					
0.1	9.41	7.85	7.77	16.58	17.41
0.2	9.41	6.54	6.47	30.49	31.17
0.3	14.12	11.19	11.10	20.73	21.42
0.4	18.83	15.90	15.75	15.56	16.37
0.5	23.54	20.57	20.35	12.63	13.58
0.6	28.25	25.24	24.94	10.64	11.72
0.7	32.95	29.89	29.52	9.28	10.40
0.8	37.64	34.52	34.08	8.30	9.46
0.9	42.33	39.15	38.65	7.52	8.70
1	47.02	43.78	43.21	6.89	8.09
Northridge					
0.1	3.65	3.35	3.28	8.24	10.16
0.2	7.26	6.09	5.89	16.14	18.86
0.3	10.87	9.13	9.02	15.98	16.99
0.4	14.48	12.24	11.96	15.47	17.40
0.5	18.09	15.40	14.94	14.86	17.41
0.6	21.69	18.48	17.94	14.84	17.32
0.7	25.30	21.67	20.97	14.34	17.12
0.8	28.91	24.87	24.14	13.94	16.50
0.9	32.51	28.11	27.25	13.53	16.17
1	36.11	31.36	30.41	13.15	15.79

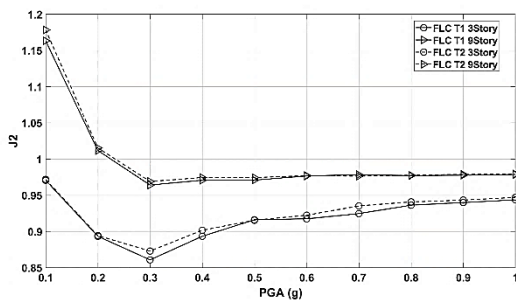
جدول ۸. حداکثر پاسخ جابه‌جایی طبقه بام سازه نه طبقه برای سامانه‌های مختلف کنترل تحت تحریک زلزله

PGA(g)	Peak response of displacement (cm)			Improvement percentage (%)	
	Uncontrolled	FLC T1	FLC T2	FLC T1	FLC T2
El Centro					
0.1	9.51	8.05	7.62	15.40	19.92
0.2	19.17	15.91	15.14	17.01	21.02
0.3	28.82	25.17	23.89	12.68	17.12
0.4	38.48	34.46	32.73	10.44	14.92
0.5	48.13	43.79	41.58	9.03	13.61
0.6	57.79	53.16	50.46	8.00	12.67
0.7	67.44	62.51	59.34	7.31	12.01
0.8	77.10	71.87	68.22	6.78	11.51
0.9	86.76	81.24	77.09	6.36	11.14
1	96.42	90.57	85.97	6.06	10.83
Kern County					
0.1	9.30	7.75	7.39	16.66	20.55
0.2	18.38	14.81	14.11	19.45	23.26
0.3	27.47	21.72	20.72	20.94	24.58
0.4	36.55	28.43	27.13	22.24	25.77
0.5	45.64	35.36	33.73	22.51	26.10
0.6	54.72	42.20	40.29	22.88	26.38
0.7	63.81	50.26	48.07	21.23	24.66
0.8	72.89	58.51	55.95	19.73	23.24
0.9	81.97	66.66	63.79	18.69	22.18
1	91.06	75.63	72.07	16.95	20.86
Kobe					
0.1	15.42	21.37	21.15	-38.56	-37.16
0.2	15.42	17.81	17.63	-15.46	-14.30
0.3	23.24	24.22	23.79	-4.19	-2.33
0.4	31.07	31.26	30.76	-0.61	0.98
0.5	38.89	38.73	38.03	0.40	2.20
0.6	46.71	46.18	45.42	1.15	2.78
0.7	54.54	53.72	52.97	1.49	2.87
0.8	62.36	61.37	60.43	1.59	3.10
0.9	70.19	68.93	67.91	1.79	3.24
1	78.01	76.50	75.38	1.94	3.37
Northridge					
0.1	12.61	8.64	8.37	31.47	33.64
0.2	25.06	17.13	16.71	31.65	33.29
0.3	37.50	27.54	26.63	26.56	29.00
0.4	49.95	39.18	37.95	21.56	24.03
0.5	62.39	50.85	49.13	18.50	21.25
0.6	71.84	60.28	58.34	16.09	18.80
0.7	80.30	68.93	67.10	14.16	16.43
0.8	87.76	77.44	74.83	11.75	14.73
0.9	94.22	84.10	81.27	10.74	13.74
1	98.44	88.86	85.84	9.73	12.79

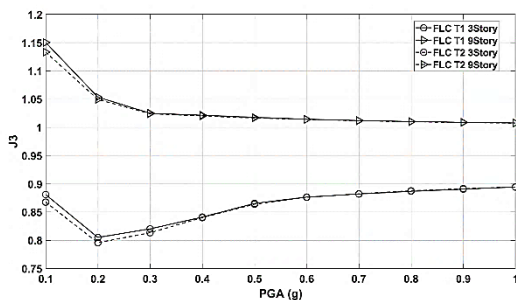
در نتیجه همان گونه که در شکل ۸ نشان داده شده، کنترل فازی نوع ۲ به خوبی توانسته است با بهبود پاسخ‌های جابه‌جایی دو سازه، احتمال برخورد سازه‌ها را به‌طور مطلوب کاهش دهد.



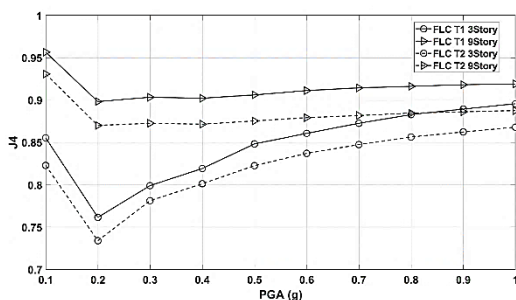
شکل ۸. مقادیر میانگین معیار ارزیابی I_1 برای چهار زلزله



شکل ۹. مقادیر میانگین معیار ارزیابی I_2 برای چهار زلزله



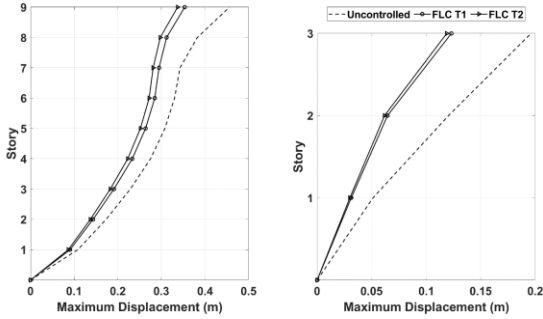
شکل ۱۰. مقادیر میانگین معیار ارزیابی I_3 برای چهار زلزله



شکل ۱۱. مقادیر میانگین معیار ارزیابی I_4 برای چهار زلزله

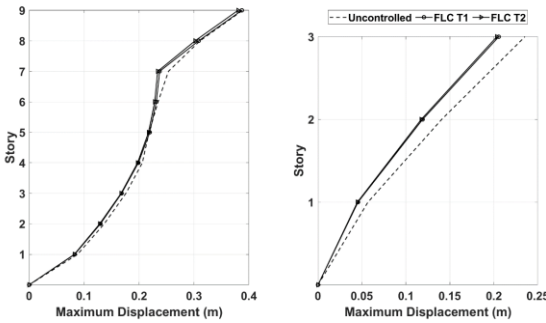
جدول ۷ و ۸، به ترتیب حداکثر مقادیر پاسخ جابه‌جایی طبقه آخر سازه سه طبقه و نه طبقه را تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک نشان می‌دهند. علاوه بر این، مقادیر درصد بهبود با استفاده از کنترل فازی نیز در جداول نشان داده شده است. نتایج مربوط به تحلیل‌های دینامیکی انجام شده نشان می‌دهد که به صورت کلی دو کنترل فازی نوع ۱ و نوع ۲ توانایی کاهش مقادیر جابه‌جایی سازه‌ها را تا حد خوبی داشته‌اند و مقادیر ولتاژ که توسط این سامانه‌ها تصمیم‌گیری شده‌اند به خوبی توانسته‌اند نیروهای اعمالی به میراگر و در نتیجه عملکرد میراگر سیال مغناطیسی را حین وقوع زلزله‌های مختلف کنترل کنند. این موضوع در کنترل فازی نوع ۲ که از توابع عضویت به صورت بازه‌ای بهره‌مند هست، مشهودتر است که علت آن را می‌توان در تفاوت اصلی این دو سامانه یعنی توابع عضویت جستجو کرد. توابع عضویت به صورت بازه‌ای قابلیت بیشتری به کنترل فازی برای مواجهه با عدم قطعیت‌های موجود را می‌دهد.

میانگین مقادیر معیارهای ارزیابی معرفی شده تحت چهار زلزله و در بیشینه شتاب‌های مختلف برای سازه‌های سه و نه طبقه شکل ۸ تا شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند. با بررسی و مقایسه عملکرد سامانه‌های کنترل مختلف می‌توان نتیجه گرفت که به‌طور کلی کنترل فازی نوع ۱ و نوع ۲ در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها حین اعمال رکورد زلزله و همچنین کاهش خطر برخورد دو سازه با یکدیگر مؤثر واقع شده‌اند که در این میان، عملکرد مناسب‌تر کنترل فازی نوع ۲ در بیشینه شتاب‌های مختلف، مشهود است. علاوه بر این مشاهده می‌شود که نیروی کنترلی به‌دست آمده از سامانه‌های فازی معرفی شده، در کاهش پاسخ‌های سازه سه طبقه نسبت به سازه نه طبقه، مؤثرتر بوده است. برتری کنترل فازی نوع ۲ که از توابع عضویت بازه‌ای بهره می‌برد در معیار ارزیابی I_1 که مربوط به بیشینه جابه‌جایی است، در بیشینه شتاب‌های مختلف مشاهده می‌شود که این امر نشان‌دهنده عملکرد مناسب این کنترل‌کننده در کاهش جابه‌جایی سازه‌ها دارد و



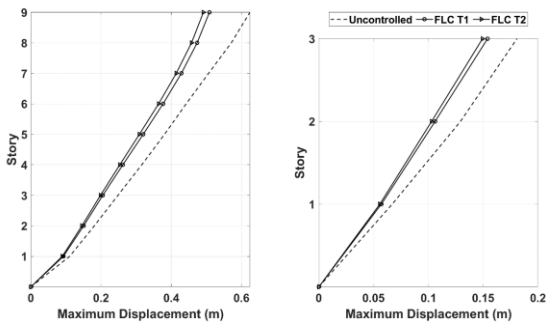
شکل ۱۴. حداکثر جابه‌جایی طبقات دو سازه تحت زلزله کرن

کانتی در بیشینه شتاب $0.5g$



شکل ۱۵. حداکثر جابه‌جایی طبقات دو سازه تحت زلزله کوبه

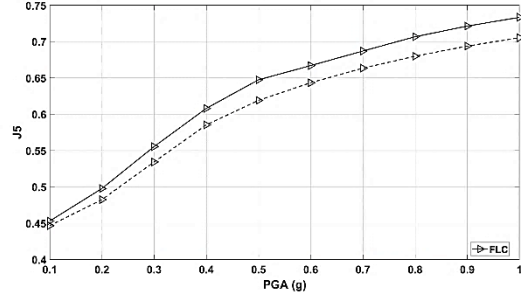
در بیشینه شتاب $0.5g$



شکل ۱۶. حداکثر جابه‌جایی طبقات دو سازه تحت زلزله

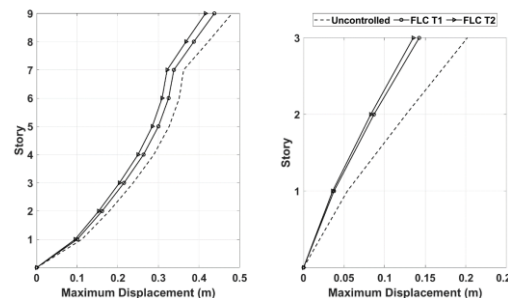
نورثریج در بیشینه شتاب $0.5g$

همچنین در شکل ۱۷ تا شکل ۲۰، تاریخچه زمانی جابه‌جایی بام دو سازه تحت زلزله السنترو (حوزه دور) و زلزله کوبه (حوزه نزدیک) در بیشینه شتاب $0.5g$ در سه حالت کنترل نشده، کنترل فاز ۱ نوع و کنترل فاز ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل‌ها مشخص شده، سامانه‌های کنترلی به‌خوبی توانسته‌اند مقادیر حداکثر جابه‌جایی طبقه بام سازه سه و نه طبقه را کاهش دهند که



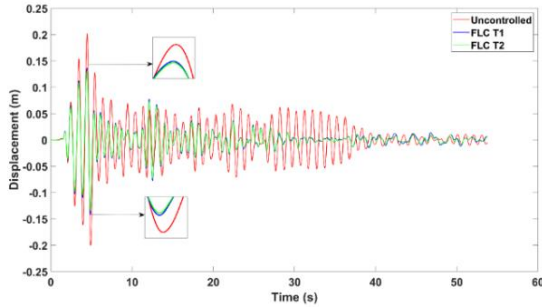
شکل ۱۲. مقادیر میانگین معیار ارزیابی ۵ برای چهار زلزله

برای نشان دادن رفتار لرزه‌ای سامانه‌های کنترلی معرفی شده، مقادیر حداکثر جابه‌جایی طبقات سازه سه طبقه و نه طبقه تحت رکورد زلزله‌های حوزه دور (السنترو و کرن کانتی) و حوزه نزدیک (کوبه و نورثریج) در بیشینه شتاب $0.5g$ نشان داده شده است در شکل ۱۳ تا شکل ۱۶ قابل مشاهده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کنترل فاز ۱ به‌خوبی توانسته است مقادیر حداکثر جابه‌جایی تمامی طبقات سازه‌ها را در مقایسه با حالت کنترل نشده کاهش دهد که این موضوع در سازه سه طبقه مشهودتر است. این موضوع گواه بر عملکرد مناسب سامانه‌های نیمه‌فعال استفاده شده در این مطالعه در کنترل ارتعاش سازه‌ها حین وقوع زلزله است. علاوه بر این در تأیید نتایجی که از بررسی تحلیل‌های دینامیکی انجام شده براساس معیار ارزیابی بیشینه جابه‌جایی به‌دست آمد، مشاهده می‌شود که کنترل فاز ۲ نوع ۲ عملکرد بهتری در مقایسه با کنترل فاز ۱ نوع ۱ در کاهش پاسخ جابه‌جایی سازه‌ها داشته است.

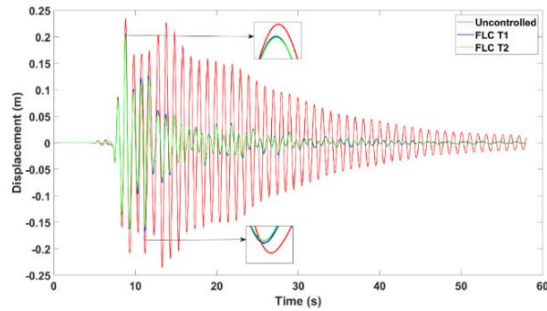


شکل ۱۳. حداکثر جابه‌جایی طبقات دو سازه تحت زلزله السنترو

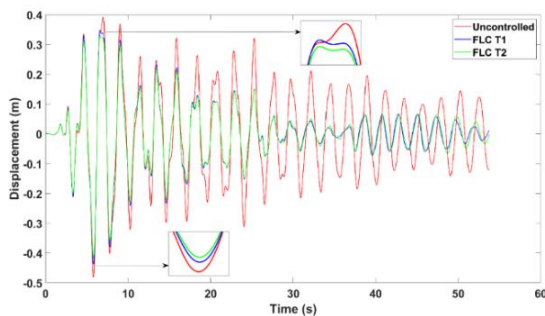
در بیشینه شتاب $0.5g$



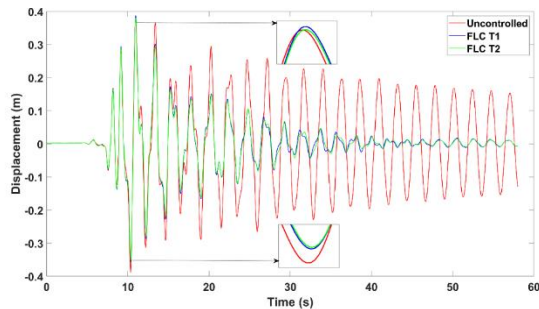
شکل ۱۷. تغییر مکان بام سازه سه طبقه تحت زلزله السنترو در بیشینه شتاب ۰/۵ g



شکل ۱۸. تغییر مکان بام سازه سه طبقه تحت زلزله کوبه در بیشینه شتاب ۰/۵ g



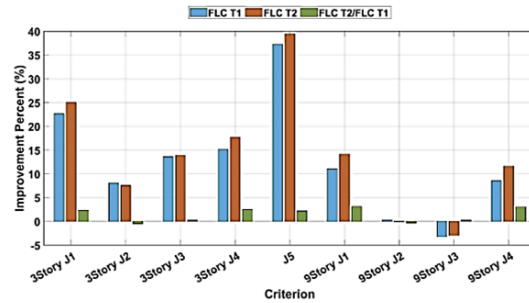
شکل ۱۹. تغییر مکان بام سازه نه طبقه تحت زلزله السنترو در بیشینه شتاب ۰/۵ g



شکل ۲۰. تغییر مکان بام سازه نه طبقه تحت زلزله کوبه در بیشینه شتاب ۰/۵ g

این موضوع تحت زلزله‌های حوزه دور مشهودتر است. قسمت‌های بزرگ‌نمایی شده در تاریخچه زمانی پاسخ‌ها مربوط به لحظاتی از اعمال زلزله است که در واقع بیشینه پاسخ‌ها در این محدوده اتفاق می‌افتد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عملکرد بهتر کنترل فازی نوع ۲ در مقایسه با کنترل فازی نوع ۱ در کاهش جابه‌جایی بام سازه‌ها مشهود است. جهت بررسی عملکرد کلی سامانه‌های فازی ارائه شده تحت تحلیل‌های دینامیکی متعددی که تحت زلزله‌های مختلف با محتوای فرکانسی متفاوت و در بیشینه شتاب‌های مختلف انجام شده است، میانگین عملکرد کنترل‌کننده‌های فازی نوع ۱ و نوع ۲ بر اساس معیارهای ارزیابی که در قسمت‌های پیشین معرفی شده‌اند، در شکل ۲۱ نشان داده شده است. به‌طور کلی نتایج تحلیل‌ها عملکرد مطلوب سامانه‌های فازی در کاهش پاسخ‌های سازه‌ها را نشان می‌دهند و با استفاده از کنترل‌کننده‌های فازی نوع ۱ و نوع ۲، خطر برخورد سازه‌ها به ترتیب ۳۷/۵ و ۳۹/۷ درصد کاهش یافته است. همچنین سازه سه طبقه تأثیر بیشتری از به‌کارگیری سامانه‌های فازی گرفته است به‌صورتی که کنترل فازی نوع ۱ و نوع ۲ قادر بوده‌اند مقادیر حداکثر جابه‌جایی، شتاب و برش پایه در سازه سه طبقه را به ترتیب ۲۲/۶، ۸، ۱۳/۵ و ۲۵، ۷/۵، ۱۳/۹ درصد کاهش دهند. همان‌طور که در شکل ۲۱ نشان داده شده است، کنترل فازی نوع ۲ عموماً عملکرد مناسب‌تری در کاهش پاسخ‌ها از خود نشان داده است به‌طوری که کنترل فازی نوع ۲ در مقایسه با کنترل فازی نوع ۱، در سازه سه طبقه و نه طبقه به ترتیب ۲/۴ و ۳/۱ درصد در کاهش معیار ارزیابی حداکثر جابه‌جایی طبقه بام سازه‌ها مؤثرتر بوده است. مقایسه سایر معیارهای ارزیابی و همچنین سامانه‌های کنترل نسبت به یکدیگر برای دو سازه در شکل ۲۱ نشان داده شده است. این موضوع در معیار ارزیابی J_5 مربوط به عملکرد سامانه‌ها در کاهش احتمال رخداد پدیده برخورد بین سازه‌ها نیز مشهود است و کنترل فازی نوع ۲ عملکرد بهتری در کاهش احتمال برخورد سازه‌ها از خود نشان داده است.

است به‌عنوان ورودی کنترل فازی مورد استفاده قرار گرفته است و سامانه‌های کنترلی براساس قوانین فازی برپایه ارتعاش همسان دو سازه و در نتیجه کاهش احتمال برخورد سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج تحلیل‌های دینامیکی انجام گرفته نشان می‌دهند که احتمال برخورد سازه‌ها با استفاده از سامانه‌های فازی نوع ۱ و نوع ۲، به‌ترتیب ۳۷/۵ و ۳۹/۷ درصد کاهش یافته است که این امر نشان‌دهنده عملکرد مناسب سامانه‌های کنترلی در کاهش ارتعاشات دو سازه است. همچنین کنترل فازی نوع ۲ عموماً عملکرد مناسب‌تری در کاهش پاسخ‌ها از خود نشان داده است به‌طوری‌که کنترل فازی نوع ۲ در مقایسه با کنترل فازی نوع ۱، در سازه سه طبقه و نه طبقه به‌ترتیب ۲/۴ و ۳/۱ درصد در کاهش معیار ارزیابی حداکثر جابه‌جایی طبقه بام سازه‌ها مؤثرتر بوده است.



شکل ۲۱. درصد بهبود کنترل‌های فازی نوع ۱ و نوع ۲

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، جهت بهبود ارتعاشات سازه‌های معیار متصل شده با میراگر سیال مغناطیسی تحت تحریک لرزه‌های زلزله‌های السنترو، کرن کانتی، کوبه و نورث‌ریج در بیشینه شتاب‌های مختلف از سامانه‌های کنترل نیمه‌فعال فازی نوع ۱ و نوع ۲ استفاده شد. میراگر مورد استفاده که قابلیت تولید نیروی کنترلی معادل ۱۰۰۰ کیلونیوتن را داشته است در تراز طبقه سوم سازه‌ها قرار گرفته است. مقادیر جابه‌جایی دو سازه که از طریق سنسورها و به‌صورت لحظه‌ای برداشت شده

۶. مأخذ

- [1] Klir G. J., and Bo Y., eds, "Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers by Lotfi A Zadeh", Vol.6. World Scientific, 1996.
- [2] Mamdani E.H., "Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant", *Proc. Iee*, 1974, Vol.121, pp.1585-1588.
- [3] Brown C.B., and Yao J. TP, "Fuzzy sets and structural engineering", *Journal of structural engineering*, 1983, Vol.109, No.5, pp.1211-1225.
- [4] Battaini M., Casciati F., and Faravelli L., "Fuzzy control of structural vibration. An active mass system driven by a fuzzy controller", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1998, Vol.27, No.11, pp.1267-1276.
- [5] Choi K.M, Cho S.W, Jung H.J, and Lee I.W, "Semi-active fuzzy control for seismic response reduction using magnetorheological dampers", *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2004, Vol.3, No.6, pp.723-736.
- [6] Yan G., and Zhou L.L., "Integrated fuzzy logic and genetic algorithms for multi-objective control of structures using MR dampers", *Journal of sound and vibration*, 2006, Vol.296, No.1-2, pp.368-382.
- [7] Das D., Datta T.K., and Madan A., "Semiactive fuzzy control of the seismic response of building frames with MR dampers", *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2012, Vol.41, No.1, pp.99-118.
- [8] Arsava K.S., Kim Y., Kim K.H., and Shin B.S., "Smart fuzzy control of reinforced concrete structures excited by collision-type forces", *Expert Systems with Applications*, 2015, Vol.42, No.21, pp.7929-7941.

- [9] Yang M.G, and Cai C.S., "Longitudinal vibration control for a suspension bridge subjected to vehicle braking forces and earthquake excitations based on magnetorheological dampers", *Journal of Vibration and Control*, 2016, Vol.22, No.17, pp.3659-3678.
- [10] Hagrass H., "Type-2 FLCs: A new generation of fuzzy controllers", *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2007, Vol.2, No.1, pp.30-43.
- [11] Jammeh E., Fleury M., Wagner C., Hagrass H., and Ghanbari M., "Interval type-2 fuzzy logic congestion control of video streaming", In *2008 IET 4th International Conference on Intelligent Environments*, IET, 2008, pp.1-8.
- [12] Bathaei A, Zahrai S.M., and Ramezani M., "Semi-active seismic control of an 11-DOF building model with TMD+ MR damper using type-1 and-2 fuzzy algorithms", *Journal of vibration and control*, 2018, Vol.24, No.13, pp.2938-2953.
- [13] Paul S., Yu W., and Li X., "Bidirectional active control of structures with type-2 fuzzy PD and PID", *International Journal of Systems Science*, 2018, Vol.49, No.4, pp.766-782.
- [14] Hashemi S. and Zahrai S.M. "Semi-active fuzzy control of nine-story nonlinear structure with series combination of TMD and MR dampers", *Modares Civil Engineering Journal*, 2019, Vol.19, No.2, pp.209-222, In Persian.
- [15] Ohtori Y., Christenson R. E., Spencer B. F., and Dyke S. J., "Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings", *Journal of engineering mechanics*, 2004, Vol.130, no.4, pp.366-385.
- [16] Ok S.Y, Kim D.S, Park K.S, and Koh H.M, "Semi-active fuzzy control of cable-stayed bridges using magneto-rheological dampers", *Engineering structures*, 2007, Vol.29, No.5, pp.776-788.
- [17] Abdeddaim M., Ounis A., Djedoui N., and Shrimali M.K., "Reduction of pounding between buildings using fuzzy controller", 2016, pp.985-1005.

پی نوشت:

1. Mamdani
2. Brown
3. Yao
4. Battaini
5. Choi
6. Clipped-optimal
7. Yan
8. Zhou
9. Das
10. MATLAB
11. Arsava
12. Proportional Integral Derivative (PID)
13. Yang
14. Cai
15. Pingsheng
16. Jammeh
17. Incremental Dynamic Analysis
18. Paul
19. OpenSees
20. Bouc-Wen
21. Evolutionary Variable
22. Ok
23. Fuzzification
24. Fuzzy Inference System
25. Defuzzification
26. Membership Functions
27. IF-THEN
28. Abdeddaim