

اثر بیشینه شتاب زلزله بر کنترل فازی نیمه فعال سازه با میراگر مایع تنظیم شونده

Peak Ground Acceleration's Impact on Semi-Active Fuzzy Control Using Adjustable Liquid Damper

چکیده

سازه‌های بلندمرتبه در مناطق لرزه خیز به سیستم‌های کنترلی کارآمد نیاز دارند تا پاسخ‌های دینامیکی شدید ناشی از زلزله را کاهش دهند. میراگرهای مایع با پرهی قابل تنظیم، به عنوان یک سیستم نیمه فعال، گزینه‌ای مؤثر برای این منظور محسوب می‌شوند. با این حال، سیستم‌های کنترل غیرفعال یا بهینه خطی ممکن است در تمامی سناریوهای لرزه‌ای عملکرد مطلوبی نداشته باشند؛ از این رو، توسعه سیستم‌های تطبیق پذیر مانند کنترل فازی که قابلیت تنظیم خودکار در لحظه را دارند، ضروری است. در این مطالعه، عملکرد کنترل فازی در مقایسه با روش‌های کنترل غیرفعال و بهینه خطی بر روی یک سازه‌ی یک درجه آزادی مجهز به میراگر مایع، تحت زلزله‌های متفاوت (حوزه دور-گسل، نزدیک-گسل و پالس نزدیک-گسل) با شدت‌های ۰٫۱ تا ۰٫۹ شتاب زمین، با استفاده از ۱۲ شاخص عملکردی بررسی شد. نتایج نشان داد که سیستم کنترل فازی به ویژه در زلزله‌های پالس نزدیک-گسل (مانند زلزله کواکلی) با کاهش ۲۰ درصدی جابجایی بام سازه، عملکرد بهتری دارد. همچنین، با افزایش شدت زلزله، کارایی این سیستم بهبود یافت و کاهش چشمگیری در ارتعاشات سازه مشاهده شد. در زلزله‌های حوزه دور-گسل نیز عملکرد کنترل فازی در اکثر موارد برابر یا بهتر از روش‌های دیگر بود و در برخی شاخص‌ها، میانگین کاهش ۲ تا ۵ درصدی ثبت شد. با این حال، در برخی زلزله‌های نزدیک-گسل، افزایش اندکی در جابجایی و پاسخ طیفی سازه مشاهده شد که ناشی از ماهیت غیرخطی زمین لرزه‌های این حوزه است. همچنین، در موارد خاص، خطای تطبیقی سیستم کنترل فازی منجر به عملکرد ضعیف تر آن در مقایسه با کنترل بهینه خطی شد.

Tall buildings in seismic regions require efficient control systems to mitigate severe dynamic responses induced by earthquakes. Adjustable baffle tuned liquid dampers, as a semi-active control system, have been proposed to reduce these responses. However, conventional passive or linear optimal control systems may not perform optimally under all seismic scenarios. Hence, developing adaptive systems such as fuzzy control with real-time self-adjusting capability is essential. This study evaluates the performance of fuzzy control compared to passive and linear quadratic regulator (LQR) control methods on a single-degree-of-freedom structure equipped with a liquid damper under various seismic excitations (far-field, near-fault, and near-fault pulse) with peak ground accelerations ranging from 0.1 to 0.9 g, using twelve performance indices. The results indicate that the fuzzy control system performs particularly well in near-fault pulse earthquakes (e.g., the Kocaeli earthquake), achieving approximately a 20% reduction in roof displacement. Moreover, as earthquake intensity increases, the system's effectiveness improves, significantly reducing structural vibrations. In far-field earthquakes, fuzzy control generally matched or outperformed other methods, with an average reduction of 2–5% in certain indices. However, some near-fault earthquakes exhibited slight increases in displacement and spectral response due to the nonlinear nature of ground motions in such events. Additionally, in specific cases, adaptive errors in the fuzzy control system led to inferior performance compared to LQR control.

کلمات کلیدی: بیشینه شتاب زمین، کنترل فازی، پاسخ دینامیکی سازه، میراگر مایع تنظیم شونده، کنترل نیمه فعال

Keywords: Peak ground acceleration, fuzzy control, structural dynamic response, adjustable liquid damper, semi-active control

در سال‌های اخیر، استفاده از سیستم‌های کنترل لرزه‌ای نیمه‌فعال به عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش آسیب‌پذیری سازه‌ها در برابر زلزله مورد توجه قرار گرفته است. گستره وسیعی از میراگرها، از جمله انواع فلزی و مایع، در این زمینه مورد بررسی و توسعه قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال، در مطالعات اخیر، روستا و همکاران به بررسی عملکرد لرزه‌ای و بهسازی قاب‌های خمشی فولادی با استفاده از میراگرهای فلزی تسلیم‌شونده پرداخته‌اند [۱]، [۲] و [۳]. این پژوهش‌ها، کارایی میراگرهایی مانند میراگرهای لوله‌ای فولادی (SPD^۱) و میراگرهای لوله‌ای دوگانه (DPD^۲) را در جذب انرژی، بهبود سختی و میرایی، و کاهش پاسخ سازه در برابر تحریکات لرزه‌ای نشان داده‌اند. در میان این سیستم‌ها، میراگرهای مایع تنظیم‌شونده (TLD^۳) به دلیل سادگی، هزینه پایین و قابلیت تنظیم، از محبوبیت ویژه‌ای برخوردار هستند. این میراگرها با جذب انرژی ارتعاشات و تبدیل آن به انرژی حرارتی، به کاهش پاسخ دینامیکی سازه‌ها کمک می‌کنند [۴] و [۵]. عملکرد میراگرهای مایع تنظیم‌شونده تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله شدت و ویژگی‌های زلزله قرار دارد. برای بهبود کارایی این میراگرها، روش‌هایی مانند افزودن صفحات یا صفحات سوراخدار به داخل مخزن پیشنهاد شده‌اند. تایت و دمتی نیز در سال ۲۰۰۵ با استفاده از صفحات سوراخدار، رویکرد مشابهی را دنبال کردند [۶]. لاو و تایت در سال ۲۰۱۰ به بررسی اثرات مختلف این صفحات بر عملکرد میراگر مایع تنظیم‌شونده پرداختند [۷]. در همین راستا، زهرایی و همکاران در سال ۲۰۱۱ رویکردی نوین را با استفاده از دریچه‌های قابل چرخش در مخزن میراگر مایع تنظیم‌شونده ارائه کردند که امکان تنظیم دقیق‌تر میزان میرایی را فراهم می‌کرد [۸]. همچنین، زهرایی و عنایتی در سال ۲۰۱۸ با بررسی عملکرد میراگر مایع مجهز به پره‌های قابل تنظیم، نشان دادند که با تنظیم مناسب زاویه پره‌ها می‌توان پاسخ لرزه‌ای سازه را به طور قابل توجهی کاهش داد. به عنوان مثال، با تنظیم زاویه پره‌ها به ۲۰ درجه، بیشترین کاهش در جابجایی سازه مشاهده شد [۹]. با توجه به اهمیت در نظر گرفتن ویژگی‌های تحریک لرزه‌ای، مطالعات متعددی به تأثیر انواع زلزله (حوزه نزدیک و دور از گسل) بر پاسخ سازه‌ها و عملکرد سیستم‌های کنترلی پرداخته‌اند. به عنوان مثال، گرامی و همکاران در سال ۲۰۱۸ در بررسی رفتار لرزه‌ای قاب‌های مرکب، به تفاوت‌های قابل توجهی در جابجایی و برش طبقات تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور از گسل اشاره کرده‌اند؛ نتایج آنها نشان داد که جابجایی‌ها تحت زلزله‌های نزدیک گسل معمولاً بیشتر است، اگرچه این اختلاف با افزایش ارتفاع سازه کاهش یافت. [۱۰]. از سوی دیگر، توسعه سیستم‌های کنترلی هوشمند که قابلیت تنظیم خودکار در لحظه را دارند، ضروری به نظر می‌رسد. زهرایی و شفیق‌زاده در سال ۲۰۰۹ با استفاده از کنترل فازی و میراگرهای قابل تنظیم، کاهش قابل توجهی در جابجایی (۴۸٪) و شتاب (۴۰٪) ساختمان‌های بلند تحت اثر باد را گزارش کرده‌اند [۱۱]. باغبان و همکاران در سال ۲۰۱۶ تأثیر مثبت کنترل‌کننده‌های فازی فعال و نیمه فعال بر عملکرد سازه‌های فولادی تحت زلزله را نشان داده‌اند و بر اهمیت در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای سازه‌ای تأکید کرده‌اند [۱۲]. عبدالطیف و حجازی در سال ۲۰۲۳ با استفاده از یک سیستم فازی بهینه شده (FLMVOC^۴)، کاهش قابل توجه شتاب سازه تحت زلزله‌های مختلف و ارتعاشات ناشی از باد را در سازه‌های بلندمرتبه مجهز به میراگر مغناطیسی نشان داده‌اند. این سیستم به ویژه در سازه شصت طبقه، توانست شتاب ناشی از زلزله‌های ال سنترو، کوبه و نورث‌ریج را به ترتیب ۳۸، ۱۷ و ۱۰ درصد کاهش دهد [۱۳]. در زمینه استفاده از روش‌های هوشمند برای کنترل خسارت، کرم‌الدین و خواجه کرم‌الدین در سال ۲۰۱۷ رویکردی نیمه‌فعال مبتنی بر الگوریتم ژنتیک-عصبی و میراگرهای مایع مغناطیسی را معرفی کردند. پژوهش آنها نشان داد که این سیستم قادر است شاخص خسارت پارک و انگ را به طور چشمگیری (تا ۷۶ درصد) کاهش دهد و در کاهش جابجایی نسبی طبقات و برش پایه عملکرد مناسبی دارد [۱۴]. همچنین، مطالعات بر اهمیت بهینه‌سازی و مکان‌یابی میراگرها در سازه‌های بلند، صرف‌نظر از نوع بارگذاری، تأکید دارند. در حالی که سیستم‌های کنترل غیرفعال مانند میراگر جرم تنظیم‌شونده (TMD^۵) به دلیل سادگی و کارایی نسبی مورد توجه قرار گرفته‌اند، عملکرد آنها تحت تأثیر ویژگی‌های مختلف زلزله متفاوت است. پورزینلی و همکاران در سال ۲۰۱۴ در یک مطالعه تجربی

1 Steel Panel Damper

2 Dual-Pipe Damper

3 Tuned liquid damper

4 Fuzzy logic multi verse optimal control

5 Tuned mass damper

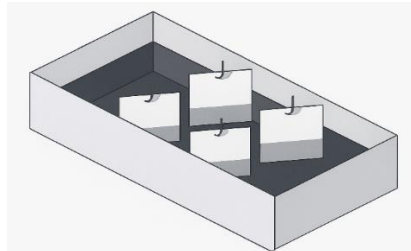
بر روی عملکرد میراگر جرمی، دریافتند که کارایی این سیستم در برابر زلزله به شدت به محتوای فرکانسی آن بستگی دارد و در برخی موارد می‌تواند منجر به افزایش پاسخ سازه نیز شود، با وجود کارایی بالا در تحریکات هارمونیک [۱۵]. این یافته‌ها بر نیاز به توسعه سیستم‌های کنترلی انعطاف‌پذیرتر و تطبیق‌پذیرتر تأکید می‌کند که بتوانند در برابر طیف وسیعی از تحریکات لرزه‌ای عملکرد مطلوبی ارائه دهند. علاوه بر این، خدایی و تیموری در سال ۲۰۲۲ در بررسی تأثیر پارامترهای میراگر جرمی تنظیم‌شونده (TMD) بر کنترل ارتعاشات ناشی از باد در ساختمان‌های بلند، نشان دادند که افزایش جرم میراگر جرمی و نصب آن در ترازهای بالاتر به طور چشمگیری ارتعاشات سازه را کاهش می‌دهد. [۱۶]. عبددائم و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از دمپر مغناطیسی رئولوژیکی (MR^۱) و کنترل‌کننده فازی، به کاهش قابل توجه خطر برخورد بین دو ساختمان کوپل شده دست یافته‌اند [۱۷]. عنایتی و روستا در سال ۲۰۲۲ با بهره‌گیری از منطق فازی برای کنترل زاویه پره‌های میراگر مایع (VBTLTD^۲)، بهبود عملکرد سازه یک درجه آزادی تحت زلزله‌های حوزه دور-گسل و نزدیک-گسل را گزارش کرده‌اند. این روش کنترل، به دلیل انعطاف‌پذیری و عدم نیاز به محاسبات پیچیده، نسبت به کنترل بهینه خطی در کاهش برش پایه و پاسخ سازه عملکرد بهتری داشت [۱۸]. بهمنی و زهرایی در سال ۲۰۲۳ کارایی سیستم‌های کنترل فازی نوع یک و دو در سازه‌های مجهز به میراگرهای مغناطیسی را مقایسه کرده و برتری سیستم‌های فازی نوع ۲ را در کاهش پاسخ لرزه‌ای نشان داده‌اند [۱۹]. در سال ۲۰۲۳ زمانیان و همکاران نیز با استفاده از میراگر مغناطیسی با کنترل‌کننده فازی، تغییرات حداکثر تغییر مکان و برش پایه سازه‌های نامنظم را تحت زلزله‌های نزدیک-گسل و دور-گسل بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد که این سیستم در کاهش حداکثر تغییر مکان و برش پایه سازه، به ویژه در سازه‌هایی با نامنظمی در طبقات پایین‌تر، بسیار موثر است [۲۰]. بهمنی و زهرایی نیز در سال ۲۰۲۳ با استفاده از میراگر سیال مغناطیسی و کنترل فازی، به کاهش خطر برخورد دو سازه سه و نه طبقه تحت زلزله پرداخته و بهبود قابل توجهی در پاسخ‌های لرزه‌ای این سازه‌ها را گزارش کرده‌اند. به طور خاص، این روش برای زلزله‌های حوزه دور-گسل نسبت به حوزه نزدیک، ۹٫۷۱ درصد عملکرد بهتری داشته است. همچنین، بیشینه جابجایی طبقه، شتاب، برش پایه و جابجایی نسبی طبقات در سازه سه طبقه به ترتیب ۱۷/۵۳، ۴/۹۴، ۳/۵۸ و ۱۲/۷ درصد و در سازه نه طبقه ۷/۹۳، ۷/۰۵، ۰/۶۷ و ۹/۱۳ درصد بهبود یافته است [۲۱].

در این پژوهش، با تمرکز بر بررسی اثر تغییرات بیشینه شتاب زمین (PGA^۳) بر عملکرد میراگر مایع تنظیم‌شونده تحت کنترل فازی، یک سازه یک درجه آزادی مجهز به این میراگر تحت مجموعه گسترده‌ای از رکوردهای زلزله (پالس حوزه نزدیک-گسل، حوزه نزدیک-گسل و حوزه دور-گسل) قرار گرفته است. این سیستم که توانایی تطبیق خودکار زاویه پره‌ها بر اساس الگوریتم فازی را دارد، تحت ۳۰ رکورد زلزله (۱۰ رکورد پالس حوزه نزدیک-گسل با پالس‌های بلندمدت، ۱۰ رکورد حوزه نزدیک-گسل و ۱۰ رکورد دور-گسل) مورد ارزیابی قرار گرفته است تا کارایی میراگر تحت کنترلر مورد نظر به طور جامع بررسی شود.

۲- مدل مورد مطالعه

در این مطالعه، به منظور بررسی تأثیر شدت زلزله بر کارایی سیستم‌های کنترل نیمه فعال سازه مجهز به میراگر مایع تنظیم‌شونده، دو روش کنترل فازی و بهینه خطی مورد مقایسه قرار گرفت. برای این منظور، یک مدل ساده شده از سازه یک درجه آزادی تحت تأثیر زلزله‌های با شدت‌های (۹/۱-۰/۰ شتاب زمین) شبیه‌سازی شد. این سازه با مشخصات سختی ۱۴۰۰۰ نیوتن بر متر و جرم ۳۰۰ کیلوگرم، به عنوان یک نمونه اولیه برای بررسی عملکرد میراگر مایع با پره قابل تنظیم تحت کنترل فازی در نظر گرفته شد. طرح کلی این میراگر که از نتایج آزمایشگاهی عنایتی و زهرایی اقتباس شده است [۹]، در شکل (۱) نمایش داده شده است. با مقایسه عملکرد سیستم کنترل فازی با حالت کنترل بهینه خطی، به ارزیابی کارایی هر یک از این روش‌ها در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه پرداخته شد.

1 Magnetorheological
2 Variably baffled tuned liquid damper
3 Peak ground acceleration



شکل ۱- نمایی از میراگر مایع با پره قابل تنظیم

در این پژوهش، جهت چرخش پره‌های میراگر به صورت یکسان و در محدوده‌ای مشخص در نظر گرفته شده است. میراگری که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته، دارای چهار پره در دو ردیف است که زاویه آن‌ها بین صفر تا ۹۰ درجه قابل تنظیم است. در حالت کاملاً باز (زاویه صفر درجه)، پره‌ها مانعی برای جریان سیال ایجاد نمی‌کنند و در حالت کاملاً بسته (زاویه ۹۰ درجه)، مخزن میراگر به سه قسمت مساوی تقسیم می‌شود. لازم به ذکر است که در این پژوهش، همانند مطالعات پیشین، جهت چرخش همه پره‌ها به صورت همزمان تغییر می‌کند و ۱۱ زاویه مختلف بین صفر تا ۹۰ درجه (با گام ۹ درجه) برای بررسی عملکرد میراگر در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق، سی رکورد زلزله مختلف شامل ده رکورد حوزه دور-گسل، ده رکورد حوزه نزدیک-گسل و ده رکورد پالس حوزه نزدیک-گسل به سازه اعمال شده و پاسخ‌های آن در حالت‌های مختلف کنترل مورد بررسی قرار گرفته است. زلزله‌های حوزه دور-گسل به دلیل پراکندگی انرژی در مسافت‌های طولانی، شتاب‌نگاشت‌هایی با دامنه کم و فرکانس‌های پایین‌تر دارند. در مقابل، زلزله‌های حوزه نزدیک-گسل به دلیل تمرکز انرژی در نزدیکی گسل، دارای پالس‌های قوی و کوتاه‌مدت هستند که به سازه‌ها آسیب بیشتری وارد می‌کنند. زلزله‌های حوزه نزدیک-گسل پالسی نیز زیرمجموعه‌ای از زلزله‌های حوزه نزدیک-گسل هستند که دارای پالس‌های بسیار قوی و مشخصی می‌باشند. مشخصات رکوردهای مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات رکورد های زلزله مورد استفاده

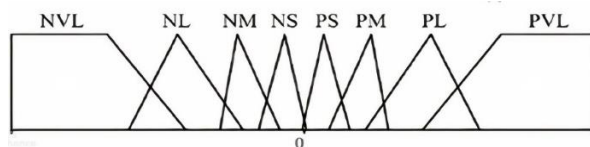
	نام رکورد زلزله	نام ایستگاه ثبت	بیشینه شتاب زمین (m/s^2)
رکوردهای حوزه دور-گسل			
F1	Borah Peak	TRA-670 ATR Reactor Bldg (Bsmt)	۰/۰۲
F2	Northern Calif	Shelter Cove, Sta A	۰/۰۳
F3	San Fernando	Wheeler Ridge - Ground	۰/۰۳
F4	Landers	Silent Valley - Poppet Flat	۰/۰۵
F5	Northridge Mojave	Oak Creek Canyon	۰/۰۵
F6	Loma Prieta	APEEL 3E Hayward CSUH	۰/۰۸
F7	Hollister	Hollister City Hall	۰/۰۹
F8	Coalinga	Parkfield - Cholame	۰/۱
F9	N. Palm Springs	Temecula - 6th & Mercedes	۰/۱۱
F10	Trinidad offshore1983	Rio Dell Overpass	۰/۱۸
رکوردهای حوزه نزدیک-گسل			
N1	San Francisco	Golden Gate Park	۰/۰۹
N2	Kern County	Taft Lincoln School	۰/۱۶
N3	San Fernando	Lake Hughes #9	۰/۱۷
N4	Oroville	Johnson Ranch	۰/۱۹
N5	Imperial Valley	Chihuahua	۰/۲۷
N6	Friuli Italy	Tolmezzo	۰/۳۶

N7	Parkfield	Cholame - Shandon	۰/۳۷
N8	Kobe Japan	Nishi-Akashi	۰/۴۸
N9	Nahanni Canada	Site 1	۱/۱۱
N10	Cape Mendocino	Cape Mendocino	۱/۴۹
رکوردهای پالس حوزه نزدیک-گسل			
P1	Landers	6281992, Barstow	۰/۱۳
P2	Kocaeli	Arcelik	۰/۲۱
P3	Morgan Hill	Gilroy Array #6	۰/۲۲
P4	Montenegro	Bar-Skupstina Opstine	۰/۳۷
P5	Cape Mendocino	Petrolia	۰/۵۹
P6	Duzce Turkey	Bolu	۰/۷۴
P7	Parkfield-02	Parkfield-Cholame	۰/۸
P8	Kobe	KJMA	۰/۸۳
P9	Northridge-01	Sylmar - Olive View Med	۰/۸۴
P10	San Fernando	Pacoima Dam	۱/۲۲

در این مطالعه، برای بررسی پاسخ سازه‌ها در برابر زلزله، از رکوردهای زلزله‌ای استفاده شده است که مولفه شمالی-جنوبی آن‌ها (یا مولفه‌ای که پس از چرخش، با جهت غالب حرکت زمین هم‌راستا شده است) برای تحلیل در نظر گرفته شده است. این رویکرد با اهمیت انطباق جهت رکوردهای زلزله با جهت حرکت غالب زمین سازگار است. به‌ویژه در مناطق نزدیک گسل (Near-Fault Regions)، استاندارد (ASCE 7-16 (Section 12.9.4.1 و راهنمای FEMA P-695 (در انتخاب رکوردهای Near-Field) بر لزوم در نظر گرفتن اثرات جهت‌پذیری (Directivity Effect) تأکید می‌کنند. پدیده جهت‌پذیری منجر به متمرکز شدن انرژی لرزه‌ای در یک پالس بزرگ و با دامنه بالا، عمدتاً در جهت عمود بر امتداد گسل (Fault-Normal) می‌شود که در نتیجه آن، ارزیابی دقیق پاسخ سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است.

۳- کنترل فازی طراحی شده

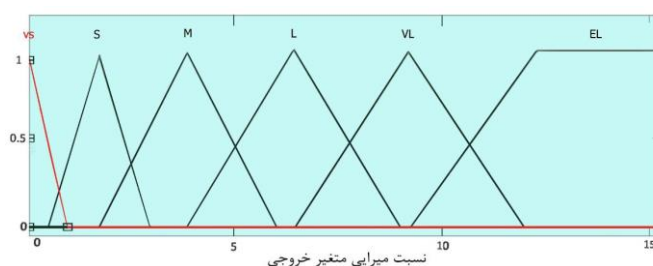
در این تحقیق، برای بررسی تأثیر شدت زمین‌لرزه بر عملکرد میراگرهای مایع قابل تنظیم در کنترل ارتعاشات سازه‌ها، از منطق فازی بهره گرفته شده است. سیستم‌های فازی با توانایی شبیه‌سازی رفتارهای پیچیده و غیرخطی سیستم‌های مکانیکی مانند میراگرهای مایع، ابزار کارآمدی برای کنترل هوشمند این سیستم‌ها محسوب می‌شوند. در این سیستم‌ها، پارامترهای فیزیکی ورودی مانند جابجایی و سرعت سازه به مفاهیم زبانی فازی مانند «جابجایی کم»، «سرعت زیاد» تبدیل شده و سپس با استفاده از قواعد فازی، تصمیم‌گیری در مورد زاویه پره‌های میراگر اتخاذ می‌شود. به عبارت دیگر، سیستم فازی به صورت هوشمند، زاویه پره‌های میراگر را تنظیم می‌کند تا ارتعاشات سازه به حداقل برسد. در مطالعه حاضر، برای هر یک از ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم، توابع عضویت مثلثی (هشت تابع عضویت ورودی و شش تابع عضویت خروجی) تعریف شده است تا بتوانیم میزان تعلق هر پارامتر به مفاهیم زبانی را مشخص کنیم. شکل (۲) نمونه‌ای از این توابع عضویت را برای ورودی نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمایی از توابع عضویت تعریف شده برای ورودی‌ها [۱۸]

هر یک از این توابع، یک محدوده مشخص از مقادیر ورودی را نشان می‌دهد. برای مثال، تابع عضویت "PVL" بیانگر مقادیر

ورودی بسیار بزرگ و مثبت است. برای نام‌گذاری این توابع، از حروف اختصاری استفاده شده است؛ مثلاً "P" برای مثبت، "N" برای منفی، "S" برای کوچک، "M" برای متوسط و "L" برای بزرگ. همچنین، "VL" نشان‌دهنده مقدار خیلی بزرگ است. بنابراین، ترکیبی مانند "PVL" به معنای «بسیار مثبت و بزرگ» است. برای تعیین میزان هم‌پوشانی بین توابع عضویت مجاور، ضریب هم‌پوشانی ۰/۵ به پیشنهاد تنگ و همکاران [۲۲] در نظر گرفته شده است. این ضریب نشان می‌دهد که تا چه اندازه توابع عضویت با هم اشتراک دارند. انتخاب مقدار مناسب برای این ضریب، نقشی کلیدی در کارایی سیستم فازی ایفا می‌کند. هم‌پوشانی بیش از حد توابع عضویت منجر به کاهش دقت سیستم شده و هم‌پوشانی کم، توانایی سیستم را در مدیریت حالات مبهم کاهش می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳) نمایش داده شده است، برای تعیین خروجی سیستم (یعنی زاویه پره‌های میراگر) از شش تابع عضویت مثلثی استفاده شده است. این توابع، با هم‌پوشانی ۰/۵، دامنه‌های مختلفی از زوایای پره‌ها را تعریف می‌کنند که هر کدام نشان‌دهنده یک سطح مشخص از میرایی هستند.



شکل ۳: نمایش از توابع عضویت تعریف شده برای خروجی‌ها [۱۸]

به منظور دستیابی به کنترل دقیق سیستم، ۶۴ قاعده فازی بر اساس روابط بین ورودی‌ها و خروجی سیستم تدوین شده است. این قواعد که به شکل «اگر-آنگاه» بیان می‌شوند و در جدول (۲) آورده شده‌اند، رفتار سیستم را در شرایط مختلف مدل‌سازی می‌کنند. برای مثال، یکی از این قواعد به صورت زیر است: «در صورتی که جابجایی "L" زیاد و سرعت "S" کم باشد، زاویه پره‌ها باید به مقدار "L" زیادی افزایش یابد.» در طراحی این قواعد، از منطق کنترل بنگ-بنگ^۱ استفاده شده است که در آن، کنترل‌گر به صورت حداکثری در یک جهت یا جهت مخالف عمل می‌کند. این رویکرد به دلیل سادگی و پاسخ سریع، برای سیستم‌هایی که نیاز به واکنش سریع دارند، مناسب است. علایم در این جدول عبارتند از: مقادیر ورودی‌های فازی جابجایی و سرعت از قبیل: NVL «منفی بسیار بزرگ»، NL «منفی بزرگ»، NM «منفی متوسط»، NS «منفی کوچک»، PS «مثبت کوچک»، PM «مثبت متوسط»، PL «مثبت بزرگ» و PVL «مثبت بسیار بزرگ». علایم خروجی‌های فازی نیز عبارتند از: VS «خیلی کوچک»، S «کم»، M «متوسط»، L «زیاد»، VL «خیلی زیاد» و EL «خیلی خیلی زیاد».

جدول ۲: جدول قواعد فازی برای طراحی کنترل [۱۸]

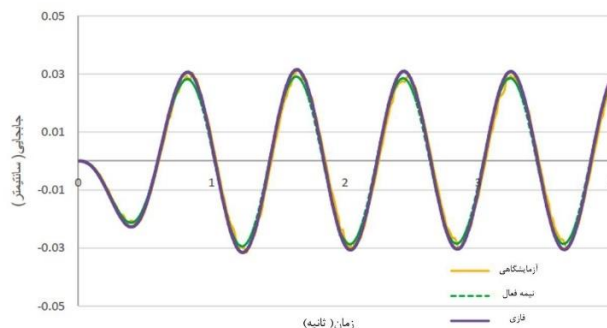
جابجایی	سرعت							
	NVL	NL	NM	NS	PS	PM	PL	PVL
سازه	NVL	NL	NM	NS	PS	PM	PL	PVL
NVL	EL	EL	EL	VL	S	S	VL	EL
NL	EL	EL	EL	L	M	S	L	VL
NM	VL	L	M	S	S	S	S	L

NS	L	M	S	VS	VS	S	M	L
PS	L	M	S	VS	VS	S	M	L
PM	L	S	S	S	S	M	L	VL
PL	VL	L	S	M	L	EL	EL	EL
PVL	EL	VL	S	S	VL	EL	EL	EL

با توجه به خروجی کنترلر فازی، کنترلر فازی با تنظیم دقیق زاویه پره‌ها، میزان میرایی سازه را به سطح مطلوب می‌رساند. برای حفاظت از سیستم، تغییرات زاویه پره‌ها به صورت تدریجی و با محدودیت ۲۱ درجه در هر گام زمانی اعمال می‌شود.

۴- صحت سنجی کنترل فازی طراحی شده

برای صحت سنجی عملکرد سیستم کنترلر فازی که در نرم‌افزار متلب^۱ پیاده‌سازی شده از نتایج تست های آزمایشگاهی انجام شده توسط عنایتی و زهرایی در آزمایشگاه میز لرزان دانشگاه تهران استفاده شده است [۲۴]. با اعمال نیروی نوسانی با فرکانس ۱/۲۵ هرتز و شتاب معادل ۰/۱ شتاب زمین، زاویه بهینه پره‌ها ۷۲ درجه است. بنابراین برای صحت سنجی کنترلر فازی و الگوریتم نیمه فعال بی‌پهنه خطی یک تحریک با فرکانس ۱/۲۵ هرتز و شتاب معادل ۰/۱ شتاب زمین به سازه اعمال گردید و همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد سیستم در کمترین زمان ممکن به این زاویه می‌رسد، که این امر از تطابق پاسخ جابجایی در شکل (۴) مورد تایید می‌باشد.



شکل ۴: نتایج پاسخ جابجایی سازه مدل شده یک درجه آزادی به منظور صحت سنجی

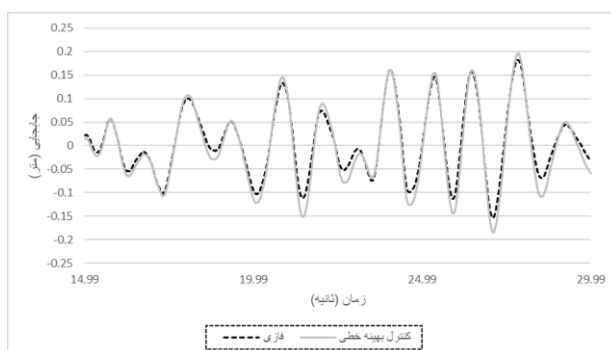
۵- نتایج

در این پژوهش، به بررسی تأثیر تغییرات پارامتر بیشینه شتاب زمین بر عملکرد سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال لرزه‌ای پرداخته شد. در این راستا، شتاب‌نگاشت‌های زلزله با اعمال ضرایب مقیاس‌کننده مبتنی بر بیشینه شتاب زمین در بازه ۰/۱ تا ۰/۹ شتاب زمین، به صورت گام به گام اصلاح شدند. این فرآیند، ارزیابی جامع‌تری از تأثیر سطوح مختلف شدت زلزله بر پاسخ دینامیکی سازه‌های مجهز به سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال را امکان‌پذیر کرد.

برای مدلسازی رفتار دینامیکی سازه، یک سیستم تک درجه آزادی در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شد. پارامترهای این مدل شامل جرم، سختی، میرایی سازه و مشخصات میراگر مایع تنظیم‌شونده تحت کنترل فازی بودند. با اعمال شتاب‌نگاشت‌های مقیاس‌بندی شده به این مدل، پاسخ‌های دینامیکی سازه، شامل جابجایی و شتاب در بام سازه، تحت سه سناریوی کنترل فازی،

کنترل کننده بهینه خطی (LQR^۱) و سیستم غیرفعال محاسبه و با یکدیگر مقایسه شدند.

نتایج حاصل از تحلیل پاسخ های سازه تحت رکورد زلزله حوزه نزدیک-گسل ناهانی در شکل (۵) نشان می دهد که کنترل فازي منجر به کاهش جابجایی سازه در بازه زمانی ۱۵ تا ۳۰ ثانیه شده است. این کاهش به ویژه در پیک پاسخ ها محسوس است. این بهبود عملکرد ناشی از مکانیزم هوشمند کنترل فازي است که با چرخش بهینه پره های میراگر، تلاطم سیال را افزایش داده و در نتیجه انرژی ورودی به سازه را جذب می کند. تنظیم پیوسته ضریب میرایی توسط کنترل گر فازي نیز به فراهم آوردن بهینه ترین حالت میرایی برای سازه کمک می کند.



شکل ۵: بزرگنمایی تاریخیچه زمانی پاسخ جابجایی سازه در ثانیه ۱۵ الی ۳۰ تحت زلزله حوزه نزدیک-گسل ناهانی در کنترل فازي و بهینه خطی

جدول ۳: درصد بهبود پاسخ شتاب سازه تحت زلزله پالس حوزه نزدیک-گسل کوکانلی در کنترل فازي و کنترل بهینه خطی

درصد بهبود (%)	شتاب غیرفعال (m/s ²)	شتاب فازي (m/s ²)
۰/۷۶	۲/۴۶۸۱	۲/۴۴۹۳
۲/۸۵	۰/۳۰۰۵۸۴	۰/۲۹۲۰۲۵

جدول ۴: درصد بهبود پاسخ جابجایی سازه تحت زلزله پالس حوزه نزدیک-گسل کوکانلی در کنترل فازي و کنترل غیرفعال

درصد بهبود (%)	جابجایی غیرفعال (m)	جابجایی فازي (m)
۱/۸۶	۰/۰۵۰۵	۰/۰۴۹۶
۰/۰۳	۰/۰۰۹۹۰۰	۰/۰۰۹۸۹۷

داده های ارائه شده در جداول (۳) و (۴) نیز مؤید این مطلب است که، سیستم کنترل فازي به طور قابل مثری در کاهش پاسخ های دینامیکی سازه، به ویژه شتاب سازه، نسبت به سیستم کنترل کننده بهینه خطی و کنترل غیرفعال بهینه تر عمل کرده است. این بهبود عملکرد در هر دو پاسخ حداکثر شتاب و جذر مجموع مربعات (RMS^۲) جابجایی و شتاب مشاهده می شود. کاهش شتاب سازه علاوه بر افزایش ایمنی، به بهبود آسایش ساکنان نیز کمک می کند. ویژگی بارز سیستم کنترل فازي طراحی شده، کاهش شتاب نه تنها در نقاط بیشینه پاسخ، بلکه در کل بازه زمانی تحریک است. این ویژگی از ماهیت تطبیقی و انعطاف پذیر کنترل گر فازي نشئت می گیرد، که با استفاده از قوانین منطق فازي، ضریب میرایی را به صورت آنلاین و متناسب با تغییرات غیرخطی سیستم بهینه می کند. در مقابل، کنترل بهینه خطی به دلیل وابستگی به مدل دقیق سازه، نیاز به حل معادلات پیچیده، و تأخیر محاسباتی، در شرایط دینامیکی متغیر با محدودیت مواجه است.

در این بخش، جهت انجام یک تحلیل جامع از عملکرد نسبی سیستم های کنترل فازي، بهینه خطی و غیرفعال، مجموعه ای شامل ۱۲ پارامتر کمی تعریف گردید. این پارامترها که با نمادهای R1 تا R12 مشخص شده اند، به منظور ارزیابی درصد بهبود در

1 Linear quadratic regulator

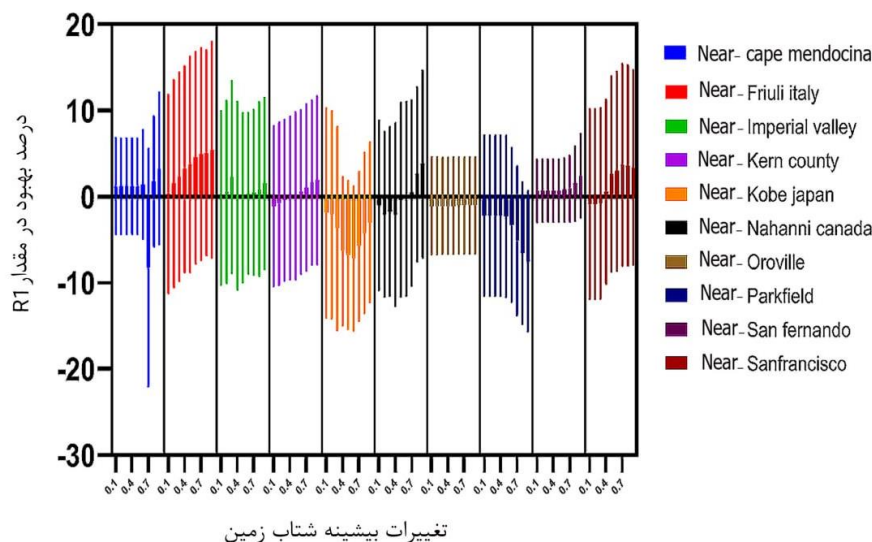
2 Square root of the sum of the squares

پارامترهای پاسخ دینامیکی کلیدی سازه، از جمله شتاب، جابجایی و برش پایه، در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، از آزمون واریانس دوطرفه^۱ با بهره‌گیری از نرم‌افزار گراف‌پد پریزم^۲ استفاده شده است. جدول (۵)، تعاریف دقیق این شاخص‌های عملکرد را ارائه می‌دهد.

جدول ۵: تعریف پارامترهای R1 تا R12

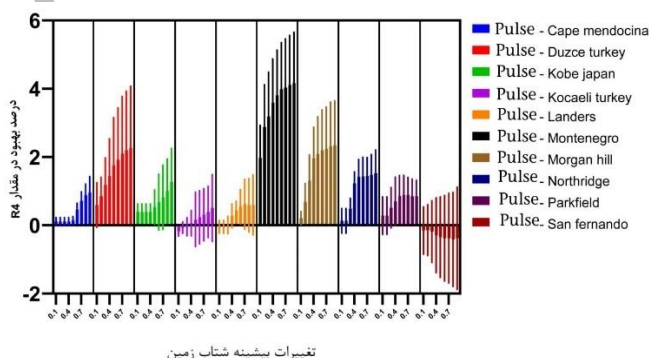
نام پارامتر	تعریف بر مبنای درصد بهبود
R1	بیشینه جابجایی بام سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی
R2	بیشینه جابجایی بام سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل غیرفعال
R3	بیشینه شتاب بام سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی
R4	بیشینه شتاب بام سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل غیرفعال
R5	بیشینه برش پایه سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی
R6	بیشینه برش پایه سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل غیرفعال
R7	جذرمجموع مربعات جابجایی بام سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی
R8	جذرمجموع مربعات جابجایی بام سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل غیرفعال
R9	جذرمجموع مربعات شتاب بام سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی
R10	جذرمجموع مربعات شتاب بام سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل غیرفعال
R11	جذرمجموع مربعات برش پایه در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی
R12	جذرمجموع مربعات برش پایه در کنترل فازی نسبت به کنترل غیرفعال

نتایج مربوط به کاهش بیشینه جابجایی بام سازه (شاخص R1) تحت رکوردهای زلزله حوزه نزدیک-گسل در شکل (۶) نشان می‌دهد، که با افزایش PGA، بهبود عملکرد سیستم کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی عموماً روند صعودی دارد. این امر ناشی از توانایی سیستم در انطباق دینامیکی با تغییرات پاسخ سازه تحت شدت‌های مختلف زلزله است.



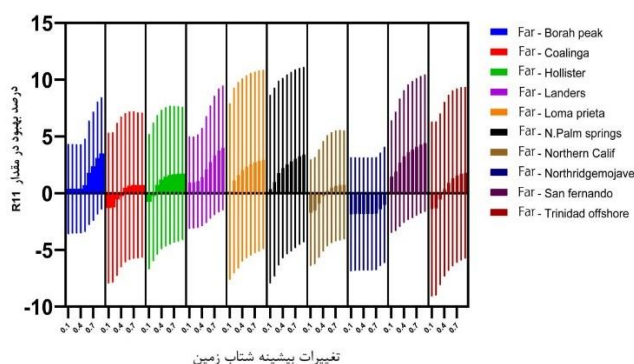
شکل ۶: اثر تغییرات بیشینه شتاب زمین بر پارامتر R1 در زلزله‌های غیر پالس حوزه نزدیک-گسل

شکل (۷)، برتری عمومی کنترل فازی بر سیستم غیرفعال را در کاهش مقدار بیشینه شتاب نشان می‌دهد. در رکوردهایی مانند "Montenegro" و "Duzce turkey"، درصد بهبود R4 به وضوح بالاتر است (به ترتیب در حدود ۴٪ تا ۵٫۵٪ و ۲٪ تا ۴٪). این بهبود، به همپوشانی مطلوب ویژگی‌های فرکانسی پالس غالب این زلزله‌ها با محدوده عملکرد بهینه میراگر مایع تنظیم‌شونده و قوانین فازی آن اشاره دارد. این رکوردهای دارای پالس‌های مشخص سرعت یا جابجایی هستند که سیستم کنترل فازی می‌تواند به طور مؤثرتری به آن‌ها واکنش نشان دهد. در رکوردهایی مانند "Cape Mendocina" و "Kobe Japan"، درصد بهبود در محدوده ۰٫۵٪ تا ۲٪ قرار دارد. این تفاوت در کارایی می‌تواند به تغییرات در محتوای فرکانسی، مدت زمان پالس، یا شکل پالس در این زلزله‌ها نسبت داده شود که ممکن است بهینه سازی عملکرد کنترل فازی را نسبت به رکوردهای ذکر شده در بالا کمی دشوارتر کند. در برخی رکوردهای خاص نظیر "San fernando"، به ویژه در بیشینه شتاب‌های بالاتر (مثلاً $g \cdot 0/7$ به بعد)، شاخص R4 مقادیر منفی (مثلاً حدود -۱٪ تا -۲٪) را نشان می‌دهد. این پدیده می‌تواند ناشی از عواملی مانند تشدید برخی مودهای ارتعاشی در برخی فرکانس‌ها و شدت‌های خاص، اشباع عملکرد میراگر یا کنترل‌گر در شدت‌های بسیار بالا (بیشینه شتاب‌های نزدیک به $g \cdot 0/9$) و اثرات غیرخطی پیچیده در زلزله‌های شدید باشد. این سیستم، به دلیل قابلیت انطباق خودکار، در اکثر سناریوها عملکرد بهبود یافته‌ای را ارائه می‌دهد و با افزایش شدت زلزله، کارایی آن نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۷: اثر تغییرات بیشینه شتاب زمین بر پارامتر R4 در زلزله‌های پالس حوزه نزدیک-گسل

شکل (۸)، درصد بهبود شاخص R11 (جذر مجموع مربعات برش پایه در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی) را تحت رکوردهای مختلف زلزله‌های حوزه دور-گسل نشان می‌دهد. کنترل فازی در مواجهه با تحریکات لرزه‌ای غیرخطی و سطوح بالای بیشینه شتاب عملکردی پایدارتر و موثرتر نسبت به کنترل بهینه خطی نشان می‌دهد که ناشی از توانایی تطابق ذاتی کنترل فازی در مواجهه با تغییرات دینامیکی لحظه‌ای سیستم است. این موضوع به طور خاص در سطوح بیشینه شتاب $g \cdot 0.5$ به بالا به صورت منسجم در اغلب نواحی دیده می‌شود. در مقابل در سطوح پایین‌تر بیشینه شتاب که پاسخ سازه عمدتاً در ناحیه خطی است، کنترل بهینه خطی به واسطه‌ی تنظیم بهینه پره‌ها بر مبنای مدل دقیق خطی، در برخی از رکوردها نظیر "Trinidad offshore" و "Northen calif" عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد که علت آن خطای ناشی از تخمین‌های فازی در شرایط کم‌تحریک (بیشینه شتاب‌های پایین‌تر) است.



شکل ۸: اثر تغییرات بیشینه شتاب زمین بر پارامتر R11 در زلزله‌های حوزه دور-گسل

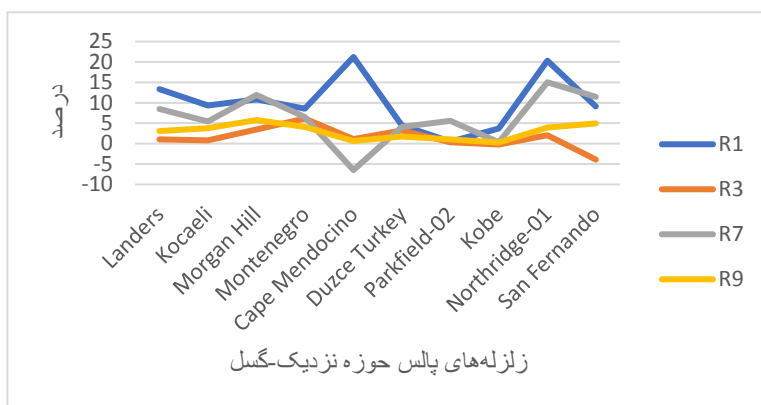
بررسی تأثیر تغییرات بیشینه شتاب زمین بر کاهش بیشینه جابجایی بام سازه در کنترل فازی نسبت به حالت غیرفعال در رکوردهای زلزله حوزه دور-گسل (R2) در جدول (۶) نشان می‌دهد، مقادیر این شاخص در بیشتر موارد بین صفر و یک بوده و حاکی از کاهش جابجایی توسط کنترل فازی است. همچنین در شتاب‌های زیاد، با افزایش انرژی ورودی به سازه، سیستم کنترل فازی با بهینه‌سازی توزیع و جریان سیال در میراگر مایع، عملکرد بهتری در جذب و میرایی انرژی ارتعاشی از خود نشان می‌دهد.

جدول ۶: اثر تغییرات بیشینه شتاب زمین بر پارامتر R2 در زلزله‌های حوزه دور-گسل

	انحراف معیار (%)	میانگین (%)	حداکثر (%)	میانۀ (%)	حداقل (%)
Borah peak	۲/۹۷	۲/۸۲	۸/۵۶	۲/۱۵	-۰/۶۱
Hollister	۱/۷	۳/۰۲	۵/۷۳	۳/۹۴	-۰/۸
Landers	۴/۴۱	۴/۰۱	۹/۳۳	۴/۹۳	-۲/۸۴
Loma prieta	۳/۵۲	۲/۰۸	۸/۷۸	۱/۶۵	-۲/۴
Northern Calif	۱/۸۲	۰/۷۱	۴/۱۶	۰/۷۸	-۲/۲۹
Northridge mojave	۳/۵	۲/۸۲	۶/۷۱	۴/۳۵	-۳/۳۲
San Fernando	۲/۹۷	۲/۸۲	۸/۵۶	۲/۱۵	-۰/۶۱

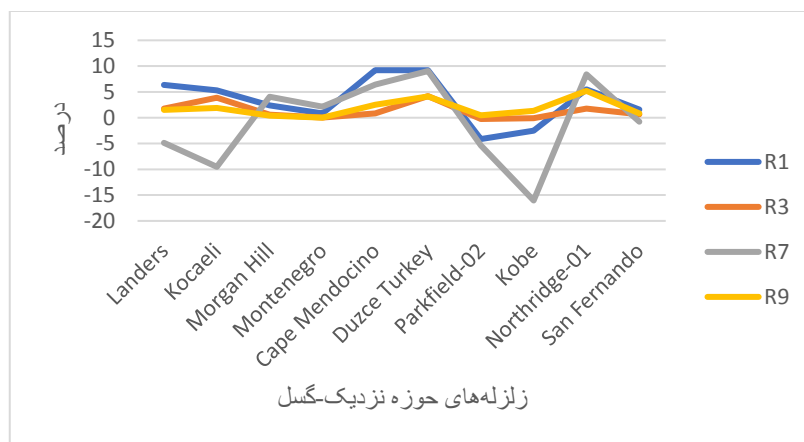
شکل‌های (۹) تا (۱۱) روند کاهش پاسخ جابجایی و شتاب در رکوردهای مختلف را نشان می‌دهد. در این نمودارها، عملکرد سیستم فازی پیشنهادی با کنترل بهینه خطی در شتاب بیشینه زمین ثابت برابر $0.8g$ برای رکوردهای زلزله در منابع مختلف مقایسه شده است. مقایسه کلی عملکرد سیستم‌ها در شکل (۹) نشان می‌دهد، کنترل فازی با بهره‌گیری از مکانیزم تطبیقی مبتنی بر قوانین اگر-آنگاه و تنظیم آنلاین ضریب میرایی، بهبود قابل توجهی در کاهش پاسخ‌های سازه ایجاد می‌کند. این بهبود در شاخص‌های

مختلفی از جمله بیشینه جابجایی بام (R1)، بیشینه شتاب بام (R3)، جذر مجموع مربعات جابجایی (R7) و شتاب بام (R9) قابل مشاهده است. به عنوان نمونه، بهبودی معادل ۲۰ درصد در شاخص بیشینه جابجایی بام و ۱۵ درصد در شاخص جذر مجموع مربعات جابجایی (R7) برای رکورد نورثریج حاصل کرده است. این عملکرد موفق ناشی از تطابق پویای سیستم فازی با پالس‌های سرعت با دامنه‌ی ۸۰ سانتی‌متر بر ثانیه و مدت زمان ۱-۲ ثانیه در این رکورد است که موجب تحریک رفتار غیرخطی سازه می‌شود. در مقابل، در رکورد کوبه با شتاب اوج برابر ۰/۸ شتاب زمین و محتوای فرکانسی گسترده (۰/۵ تا ۱۰ هرتز)، بهبود شاخص‌ها به ۵-۳ درصد محدود شد. این امر نشان‌دهنده تأثیر مولفه‌های فرکانسی بالا بر کاهش کارایی قوانین فازی در شناسایی الگوی غالب ارتعاش است. در مقابل، تأخیر زمانی در محاسبات کنترل گر بهینه‌خطی می‌تواند بر عملکرد آن تأثیر منفی بگذارد. این موضوع به ویژه در زلزله‌های حوزه نزدیک-گسل که نیاز به واکنش سریع سیستم کنترل دارند، می‌تواند مشکل ساز باشد.



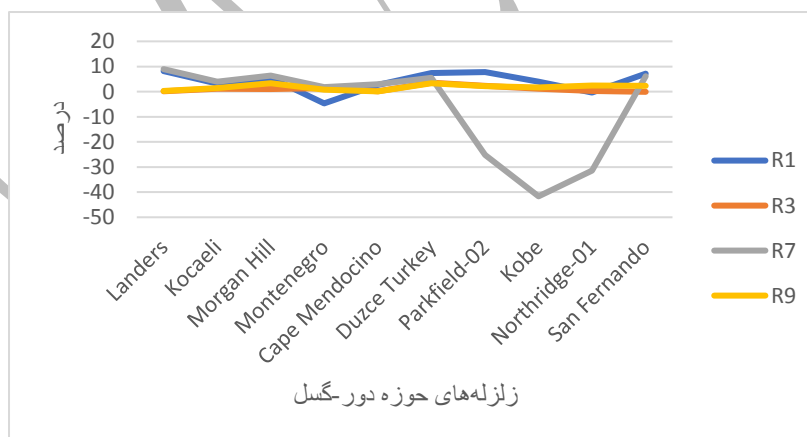
شکل ۹: درصد تغییرات پارامترهای R1، R3، R7 و R9 در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی در زلزله‌های پالس حوزه نزدیک-گسل

شکل (۱۰) حاکی از آن است که در برخی از زلزله‌های با منشا نزدیک به گسل، سیستم‌های کنترل فازی به طور موثری عملکرد لرزه‌ای را بهبود بخشیده‌اند. این بهبود به ویژه در پارامترهای مربوط به جذر مجموع مربعات جابجایی و شتاب بام (R7 و R9) مشهود و پیوسته است. به عنوان مثال، بهبود عملکرد تا ۱۰ درصد در شاخص‌های R7 و R9 را برای رکوردهای کپ مندوکینو (با پالس پیشرونده به اندازه ۱/۲ متر) و دوزجه ترکیه (دارای شتاب عمودی برابر ۰/۶ شتاب زمین) از خود نشان داده‌اند. با این حال، در برخی دیگر از زلزله‌ها، میزان بهبود کمتر بوده و حتی در مواردی، عملکرد سیستم کنترل خطی بهتر از سیستم کنترل فازی بوده است. به عنوان مثال، در زلزله لندرز با مدت تحریک طولانی (۴۰ ثانیه)، سیستم کنترل فازی در شاخص R7 عملکرد ضعیف‌تری نسبت به سیستم کنترل بهینه خطی داشته است که علت آن بهینه‌سازی مبتنی بر مدل خطی سازه در این شرایط است.



شکل ۱۰: درصد تغییرات پارامترهای R1، R3، R7 و R9 در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی در زلزله‌های حوزه نزدیک-گسل

شکل (۱۱) بیانگر آن است که سیستم کنترل فازی در برخی از شاخص‌های عملکرد، بهبودهایی را نسبت به سیستم کنترل بهینه خطی نشان می‌دهد. با این حال، در تعداد اندکی از رکوردها، در شاخص R7 (جذر مجموع مربعات جابجایی بام سازه)، عملکرد سیستم کنترل فازی در زلزله‌های حوزه دور-گسل به طور قابل توجهی ضعیف‌تر از سیستم کنترل بهینه خطی است. این چالش از انباشت خطای تطبیق^۱ در سیستم فازی طی بازه‌های زمانی طولانی (بیش از ۶۰ ثانیه) ناشی می‌شود. با این وجود، در سایر شاخص‌های عملکرد مانند R1 و R9، سیستم کنترل فازی همچنان بهبودهایی را نسبت به سیستم کنترل بهینه خطی نشان می‌دهد. این امر نشان می‌دهد که سیستم کنترل فازی همچنان می‌تواند در کاهش جابجایی سازه و بهبود پایداری آن در برابر زلزله‌های حوزه دور-گسل نیز مؤثر باشد.



شکل ۱۱: درصد تغییرات پارامترهای R1، R3، R7 و R9 در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی در زلزله‌های حوزه دور-گسل

نتایج تجمیعی شکل‌های (۹) تا (۱۱) نشان می‌دهد عملکرد سیستم کنترل فازی به طور معناداری تحت تأثیر ماهیت منشأ زلزله قرار دارد. در زلزله‌های پالس حوزه نزدیک-گسل مانند کواکالی (با پالس شبه‌ایستای ۱٫۵ ثانیه‌ای و محتوای فرکانسی ۰٫۵-۲ هرتز)، این سیستم با کاهش تا ۲۰ درصد در شاخص R1 (بیشینه جابجایی بام) و تا ۱۵ درصد در جذر مجموع مربعات جابجایی (R7)، حداکثر کارایی خود را نشان داد. این موفقیت ناشی از همپوشانی باند فرکانسی سیستم فازی (۰٫۵-۲ هرتز) با مولفه‌های غالب

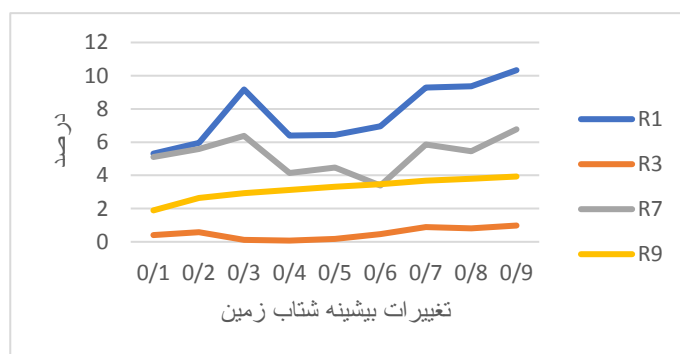
پالس‌های نزدیک-گسل و توانایی آن در تنظیم میرایی طی ۰/۱ ثانیه برای مقابله با نیروهای ضربه‌ای^۱ تا ۱/۲ برابر شتاب زمین است. در مقابل، در زلزله‌های غیرپالس حوزه نزدیک-گسل (با شتاب یکنواخت و فرکانس غالب ۵-۱ هرتز)، کاهش شاخص‌ها به ۱۰ درصد برای R1 و ۵ درصد برای R3 محدود می‌شود که علت آن فقدان مؤلفه‌های انرژی متمرکز برای فعال‌سازی بهینه قوانین فازی است. در زلزله‌های حوزه دور-گسل نیز (با فرکانس غالب ۰/۱-۰/۵ هرتز و مدت تحریک ۶۰+ ثانیه)، اگرچه سیستم فازی در شاخص R1 کاهش ۱۰ درصدی و در R9 کاهش ۳ درصدی ایجاد می‌کند، اما در شاخص R7 در تعداد کمی از رکوردها با افزایش خطا نسبت به کنترل بهینه خطی مواجه است.

شکل (۱۲)، تأثیر تغییرات بیشینه شتاب زمین بر درصد میانگین بهبود شاخص‌های R3 (بیشینه شتاب بام) و R9 (جذر مجموع مربعات شتاب بام) را در مقایسه با کنترل بهینه خطی و تحت انواع زلزله (پالس حوزه نزدیک-گسل، حوزه نزدیک-گسل و حوزه دور-گسل) در پریود ۱/۳ ثانیه به تصویر می‌کشد. نمودار به وضوح برتری سیستم کنترل فازی را در کاهش هر دو شاخص R3 و R9 نسبت به کنترل بهینه خطی در تمام سناریوهای زلزله نشان می‌دهد که بیانگر توانمندی ذاتی کنترل فازی در مدیریت پاسخ‌های دینامیکی پیچیده سازه است. بالاترین درصد بهبود در هر دو شاخص R3 و R9 مربوط به زلزله‌های پالس حوزه نزدیک-گسل (خط سبز) است. ماهیت این زلزله‌ها با پالس‌های سرعت با دامنه بزرگ، موجب تحریک شدید رفتار غیرخطی سازه می‌شوند و کنترل فازی به دلیل قابلیت تنظیم آنالین میرایی و تطبیق با تغییرات ناگهانی، در این شرایط بهینه‌ترین جذب انرژی را فراهم می‌آورد. بهبود عملکرد در دسته‌های زلزله‌های حوزه نزدیک-گسل (خط آبی) و حوزه دور-گسل (خط نارنجی) نیز مشهود است، اما مقادیر آن به ترتیب کاهشی است. این تفاوت می‌تواند ناشی از ویژگی‌های فرکانسی متفاوت و عدم وجود پالس‌های غالب مشخص در زلزله‌های غیرپالس باشد که می‌تواند منجر به فعال‌سازی کمتر بهینه قوانین فازی شود. با این حال، حتی در زلزله‌های دور-گسل، سیستم فازی همچنان بر کنترل بهینه خطی ارجحیت دارد. یک نکته حائز اهمیت، افزایش درصد بهبود با افزایش بیشینه شتاب در تمام سناریوهای زلزله است. این روند صعودی، انطباق‌پذیری بالای سیستم فازی در مواجهه با تحریکات لرزه‌ای شدید را تأیید می‌کند. همچنین شاخص R9 (جذر مجموع مربعات شتاب) به طور کلی درصد بهبود بالاتری نسبت به R3 (بیشینه شتاب) نشان می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد سیستم پیشنهادی علاوه بر کاهش پیک‌های شتاب (ایمنی سازه)، کاهش R9 نشان‌دهنده میرایی مؤثرتر و پایداری در طول زمان تحریک است که به بهبود آسایش ساکنان و کاهش آسیب‌های غیرسازه‌ای کمک می‌کند.



شکل ۱۲: ارزیابی اثر کنترل فازی در مقایسه با کنترل بهینه خطی بر بیشینه و جذر مجموع مربعات شتاب تحت تأثیر انواع زلزله در پریود ۱/۳ ثانیه

شکل (۱۳) تأثیر تغییرات بیشینه شتاب را بر درصد بهبود عملکرد پارامترهای R1, R3, R7 و R9 تحت کنترل فازي در مقایسه با کنترل بهینه خطی در زلزله پالس حوزه نزدیک-گسل کوکائلی نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار مشخص است، با افزایش بیشینه شتاب زمین، شاهد بهبود عملکرد سیستم پیشنهادی (کنترل فازي) هستیم. این بهبود در مقادیر جذر مجموع مربعات شتاب و جابجایی به طور پیوسته با افزایش بیشینه شتاب مشاهده می‌شود. به طور خاص، در بیشینه شتاب‌های پایین (مانند ۰/۱ تا ۰/۳ شتاب زمین)، کنترل فازي بهبود نسبتاً کمی (کمتر از ۲ درصد) در مقایسه با کنترل بهینه خطی ارائه می‌دهد. با این حال، با افزایش بیشینه شتاب، این بهبود چشمگیرتر می‌شود. برای مثال، در بیشینه شتاب زمین برابر با ۰/۹، مقدار بیشینه جابجایی با استفاده از کنترل فازي بیش از ۱۰ درصد نسبت به کنترل بهینه خطی کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که سیستم کنترل فازي با افزایش شدت زلزله، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد و قادر به کاهش مؤثرتر پاسخ‌های سازه است. این روند در سایر رکوردها نیز مشاهده شد.



شکل ۱۳: اثر تغییرات بیشینه شتاب زمین بر بهبود عملکرد کنترل فازي در زلزله پالس حوزه نزدیک-گسل کوکائلی

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، عملکرد میراگر مایع تنظیم‌شونده با پره‌های قابل چرخش تحت کنترل فازي در کاهش پاسخ دینامیکی یک سیستم تک‌درجه‌آزادی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. به منظور شبیه‌سازی شرایط مختلف زلزله، سازه مجهز به میراگر تحت تأثیر طیف گسترده‌ای از شتاب‌نگاشت‌های زلزله با منشأهای متفاوت (حوزه دور-گسل، نزدیک-گسل و پالس نزدیک-گسل) قرار گرفت. با اعمال مقیاس‌بندی بر روی شتاب‌نگاشت‌ها در بازه ۰/۱ تا ۰/۹ برابر بیشینه شتاب زمین (PGA)، تأثیر شدت زمین‌لرزه بر کارایی سیستم کنترل فازي ارزیابی شد. در نهایت، نتایج حاصل از کنترل فازي با دو روش مرسوم کنترل بهینه خطی (LQR) و کنترل غیرفعال، با استفاده از دوازده شاخص عملکردی (R1-R12) و تحلیل آماری مبتنی بر آزمون واریانس دوسویه (Two-way ANOVA) مقایسه گردید.

تحلیل نتایج نشان داد که به کارگیری سیستم کنترل فازي در میراگر مایع، منجر به کاهش محسوس پاسخ‌های دینامیکی جابجایی و شتاب سازه در اکثر سناریوهای زلزله نسبت به روش‌های کنترل بهینه خطی و غیرفعال می‌شود. با افزایش بیشینه شتاب از ۰/۱ شتاب زمین به ۰/۹ شتاب زمین، عملکرد سیستم کنترل فازي به طور پیوسته بهبود یافت. در سطوح پایین بیشینه شتاب زمین (۰/۱ تا ۰/۳ شتاب زمین)، بهبود عملکرد نسبت به کنترل بهینه خطی کمتر از ۲ درصد بود؛ اما در سطوح بالاتر (۰/۶ تا ۰/۹ شتاب زمین)، کاهش بیشینه جابجایی بام تا ۱۰ درصد و کاهش جذر مجموع مربعات شتاب تا ۵ درصد مشاهده شد. برای نمونه، در رکورد کوکائلی (با بیشینه شتاب زمین برابر ۰/۹ شتاب زمین)، کاهش ۱۰ درصدی در بیشینه جابجایی نسبت به کنترل بهینه خطی

ثبت گردید. همچنین در رکورد کوبه با محتوای فرکانسی گسترده (۵/۰ تا ۱۰ هرتز)، سیستم کنترل فازی به دلیل محدودیت در شناسایی الگوی غالب ارتعاش، بهبود شاخص‌ها را به ۳ تا ۵ درصد محدود کرد.

با این حال، در زلزله‌های نزدیک به گسل، علی‌رغم بهبود قابل توجه در برخی پاسخ‌ها، در تعدادی از موارد افزایش اندک جابجایی و پاسخ طیفی مشاهده شد. در زلزله‌های دور-گسل از گسل نیز، به استثنای موارد خاصی در شاخص‌های R1, R2, R3, R7 و تمامی رکوردهای شاخص R8 که عملکرد کنترل فازی کمتر مطلوب بود، در سایر شاخص‌های عملکردی، این روش هم‌تراز یا حتی برتر از روش‌های دیگر عمل کرد. برای مثال، در شاخص R10، کاهش میانگین جذر مجموع مربعات شتاب در محدوده ۲ تا ۵ درصد ثبت شد. بررسی شاخص R12 نیز نشان داد در برخی رکوردها مانند لندرز با مدت تحریک طولانی (۴۰ ثانیه)، کاهش جذر مجموع مربعات برش پایه (میانگین ۳/۱۴ درصد و حداکثر ۴/۸۸ درصد) حاصل شده است. با این حال، در همین رکورد، سیستم کنترل فازی به دلیل انباشت خطای تطبیقی در شاخص R7، عملکردی ۵ درصد ضعیف‌تر نسبت به کنترل بهینه خطی نشان داد. در شرایطی مانند زلزله‌های پالس حوزه نزدیک-گسل (مانند کوکائلی) که نیازمند واکنش سریع هستند، کنترل فازی به دلیل عدم وابستگی به مدل خطی و محاسبات آنالین، کاهش ۲۰ درصدی در بیشینه جابجایی (R1) ایجاد کرد؛ در حالی که تأخیر محاسباتی کنترل بهینه خطی منجر به عملکرد ضعیف‌تر آن شد.

کنترل فازی در زلزله‌های پالس حوزه نزدیک-گسل (مانند زلزله کوکائلی) بهترین عملکرد را داشته است و کاهشی حدود ۲۰ درصدی در جابجایی بام سازه مشاهده شد. این بهبود ناشی از توانایی سیستم فازی در تطبیق سریع با پالس‌های قوی و کوتاه‌مدت این نوع زلزله‌ها است. در زلزله‌های حوزه دور-گسل، کنترل فازی در اکثر موارد عملکردی برابر یا بهتر از روش‌های دیگر داشت، اما در برخی موارد (مانند رکورد لندرز) به دلیل انباشت خطای تطبیقی، عملکرد آن ضعیف‌تر بود. در زلزله‌های غیرپالس حوزه نزدیک-گسل، بهبود عملکرد کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی محدودتر بود (حدود ۵-۱۰ درصد). نهایتاً کنترل فازی در تمام انواع زلزله‌ها مؤثر است، اما میزان بهبود آن بسته به نوع زلزله متفاوت است. بهترین عملکرد در زلزله‌های پالس حوزه نزدیک-گسل مشاهده شد.

در مجموع، نتایج این پژوهش پتانسیل بالای سیستم‌های کنترل فازی را در ارتقای عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، به‌ویژه در زلزله‌های شدید (با بیشینه شتاب زمین بزرگتر از ۰/۶ شتاب زمین) و پالس حوزه نزدیک-گسل (مانند کوکائلی و کپ مندوکیانو) با کاهش تا ۲۰ درصدی پاسخ‌های دینامیکی، تأیید می‌کند. با این حال، عملکرد این سیستم در زلزله‌های حوزه دور-گسل با مدت تحریک طولانی (مانند لندرز) و فرکانس‌های غالب بالا (مانند کوبه) نیازمند بهینه‌سازی قوانین فازی برای کاهش خطاهای تطبیقی و بهبود شناسایی الگوی ارتعاش است. همچنین، استفاده از روش‌های ترکیبی (هیبریدی) برای ادغام مزایای کنترل فازی و کنترل بهینه خطی می‌تواند راهکاری امیدوارکننده برای پژوهش‌های آتی باشد.

واژه نامه

Peak Ground Acceleration (PGA): بیشینه شتاب زمین

Structural Dynamic Response: پاسخ دینامیکی سازه

Semi-Active Control: کنترل نیمه فعال

Far-Field Earthquakes: زلزله های حوزه دور-گسل

خطی

Passive Control: کنترل غیرفعال

Root Mean Square (RMS): جذر مجموع مربعات

GraphPad Prism: نرم افزار گراف پد پریزم

Impulsive Forces: نیروهای ضربه ای

Fuzzy Logic Control: کنترل فازی

Tuned Liquid Damper (TLD): میراگر مایع تنظیم شونده

Near-Fault Earthquakes: زلزله های حوزه نزدیک-گسل

Linear Quadratic Regulator (LQR): کنترل کننده بهینه

Bang-Bang Control: کنترل بنگ-بنگ

Two-Way ANOVA: آزمون واریانس دوسویه

Adaptation Drift: خطای تطبیقی

- [1] A. M. Roustaei, S. Shojaei, and M. Amin Safaei Ardakani, "Investigating Cyclic and Pushover Performance of Different Metallic Yielding Dampers," *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 122–143, 2023. <https://doi.org/10.22075/jrce.2022.26848.1639>.
- [2] A. M. Roustaei, "Seismic retrofitting of steel moment-resisting frames (SMRFs) using steel pipe dampers," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 87, no. 1, pp. 69–84, 2023. <https://doi.org/10.12989/sem.2023.87.1.069>.
- [3] A. M. Roustaei, M. Amin Safaei Ardakani, and S. Shojaei, "Numerical and analytical investigation of seismic performance of steel dampers with different heights and shapes," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 208–227, 2022. (In Persian). <https://doi.org/10.22065/jsce.2021.270979.2352>.
- [4] R. A. Ibrahim and S. Barr, "Autoparametric resonance in a structure containing a liquid, Part I: two mode interaction," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 42, no. 2, pp. 159–179, 1975. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(75\)90213-8](https://doi.org/10.1016/0022-460X(75)90213-8).
- [5] R. A. Ibrahim and S. Barr, "Autoparametric resonance in a structure containing a liquid, Part II: three mode interaction," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 42, no. 2, pp. 181–200, 1975. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(75\)90214-X](https://doi.org/10.1016/0022-460X(75)90214-X).
- [6] M. J. Tait, A. A. El Damatty, N. Isyumov, and M. R. Siddique, "Numerical flow models to simulate tuned liquid dampers (TLD) with slat screens," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 20, pp. 1007–1023, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2005.04.004>.
- [7] J. S. Love and M. J. Tait, "Nonlinear simulation of a tuned liquid damper with damping screens using a modal expansion technique," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 26, pp. 1058–1077, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2010.07.004>.
- [8] S. M. Zahrai, S. Abbasi, B. Samali, and Z. Vrcelj, "Experimental investigation of utilizing TLD with baffles in a scaled down 5-story benchmark building," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 28, pp. 194–210, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2011.08.016>.
- [9] S. M. Zahrai and H. Enayati, "Tuned Liquid Damper with Rotatable Baffles to Control a 5-Story Structure Model under Near and Far-Field Earthquakes," *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 139–147, 2018.
- [10] M. Gerami, A. Kheyroddin, and F. Khorasani, "Seismic Assessment of RCS Moment Frames under Near Fault Earthquakes," *Journal of Civil Engineering Ferdowsi*, vol. 31, no. 2, pp. 1–23, 2018. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/civil.v31i1.54383>.
- [11] S. M. Zahrai and A. Shafieezadeh, "Semi-active control of the wind-excited benchmark tall building using a fuzzy controller," *Iranian Journal of Science & Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 1–18, Jan. 2009. <https://doi.org/10.22099/ijstc.2009.697>.
- [12] A. Baghban, A. Karamodin, and H. Haji Kazemi, "The effect of fuzzy controller on damage of steel structure considering structural uncertainties," *Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering*, vol. 23, no. 6, pp. 2441–2450, 2016. <https://doi.org/10.24200/sci.2016.2303>.
- [13] W. S. Abdulateef and F. Hejazi, "Fuzzy logic based adaptive vibration control system for structures subjected to seismic and wind loads," *Structures*, vol. 55, pp. 1507–1531, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.06.108>.

- [14] A. Karamoddin and S. Khajeh Karamoddin, "Structural Damage Control Using Neuro-GA Algorithm," *Journal of Civil Engineering Ferdowsi*, vol. 29, no. 1, pp. 1–17, 2017. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/civil.v29i1.33759>.
- [15] S. Pourzineli, N. A. Fallah, and M. Akbari Aghbalagh, "Experimental Analysis of the TMD Control of Building Vibrations against Earthquake Excitations," *Journal of Civil Engineering Ferdowsi*, vol. 25, no. 2, pp. 147–158, 2014. (In Persian).
- [16] N. Khodaei and H. Teymouri, "Investigating the Impacts of the Mass and the Installation Height of TMD System on the Wind-Induced Vibration Control of Tall Buildings," *Journal of Civil Engineering Ferdowsi*, vol. 35, no. 4, pp. 55–70, 2022. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jfcei.2022.70265.1039>.
- [17] M. Abdeddaim, A. Ounis, N. Djedoui, and M. K. Shrimali, "Reduction of pounding between buildings using fuzzy controller," *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 17, no. 7, pp. 985–1005, 2016.
- [18] H. Enayati and A. M. Roustaei, "The investigation of the effect of earthquake type on the structures behavior with Tuned Liquid Damper with Variable Baffles under Semi-Active Control," *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, vol. 8, no. 4, pp. 77–92, 2022. <https://doi.org/10.22065/jsce.2020.172223.1786>.
- [19] M. Bahmaei and S. M. Zahrai, "Effect of selecting different membership functions on semi-active fuzzy control of adjacent buildings with MR damper," *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 54, no. 12, pp. 4709–4728, 2023. <https://doi.org/10.22060/ceej.2022.21185.7644>.
- [20] M. R. Zamanian, A. Kheyroldin, and A. R. Mortezaei, "Seismic response control of uncertainty stiffness structures subjected to near and far field earthquakes using fuzzy controlled magnetorheological dampers," *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 54, no. 1, pp. 191–208, 2023.
- [21] M. Bahmai and S. M. Zahrai, "Fuzzy semi-active control of coupled adjacent structures with magneto-rheological damper under near-field and far-field earthquakes," *Modares Civil Engineering Journal*, vol. 22, no. 6, 2023.
- [22] T. L. Teng, C. P. Peng, and C. Chuang, "A study on the application of fuzzy theory to structural active control," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 189, pp. 439–448, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(99\)00300-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00300-X).
- [23] H. Enayati and S. M. Zahrai, "A variably baffled tuned liquid damper to reduce seismic response of a five-storey building," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, vol. 171, no. 4, pp. 306–315, 2018. <https://doi.org/10.1680/jstbu.16.00034>.
- [24] S. M. Zahrai and H. Enayati, "Semi-Active Control of a SDOF Structure Using Tuned Liquid Damper with Variable Baffles," *Journal of Structure & Steel*, vol. 11, no. 21, pp. 69–80, 2017. (In Persian).