

کنترل نیمه فعال سازه محک با استفاده از کنترلر LQG همراه با یک سیستم فازی

سید حسین فضائی حسینی نژاد، عباس کرم الدین

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، گروه عمران، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

استفاده از الگوریتم مناسب جهت کاهش پاسخ های لرزه ای و به تبع آن کاهش خسارات ناشی از زلزله از اهمیت زیادی در مهندسی عمران برخوردار است. سیستم های کنترل نیمه فعال به دلیل توانایی تغییر خصوصیات مکانیکی سیستم خود و استفاده از منابع انرژی محدود مورد توجه قرار گرفته اند. از طرفی بهره جویی از محاسبات نرم و سیستم های استنتاج فازی به دلیل استفاده از دانش بشری، کمک شایانی به کاهش پاسخ های سازه در حین زلزله دارد. در این مقاله طراحی کنترل کننده یک سیستم نیمه فعال غیرخطی محک سه طبقه از نوع میراگر مغناطیسی MR بر مبنای قوانین فازی و استفاده از نیروی کنترل کننده خطی LQG مدنظر است. مدل سازی میراگر نیز بر مبنای مدل بوک-ون صورت گرفته است. در این کنترل کننده نیروی مورد نیاز سازه توسط کنترل کننده LQG همراه با نیروی اعمال شده توسط میراگر در گام قبل وارد سیستم استنتاج فازی شده و ولتاژ مورد نیاز به عنوان خروجی وارد میراگر می شود. در سیستم استنتاج، قوانین فازی بر اساس کنترل کننده قطع و وصل بهینه و قطع و وصل بهینه اصلاح شده نوشته و مقایسه ای بین آنها صورت گرفته است. هدف اصلی این کار خروج از منطق صفر و یکی و استفاده از منطق فازی برای تصمیم گیری می باشد. نتایج حاصل از معیارهای ارزیابی و نمودارهای تاریخچه زمانی نشان از کارایی بالای کنترل کننده پیشنهادی در کاهش پاسخهای لرزه ای در برابر دیگر سیستم های پیشنهادی دارد.

کلمات کلیدی: کنترل سازه ها، کنترل نیمه فعال، منطق فازی، میراگر MR، کنترل کننده LQG

۱. مقدمه

سیستم های کنترل نیمه فعال به دلیل عدم نیاز به منبع انرژی با توان بالا و قابلیت اطمینان بیشتر نسبت به سیستم های فعال مورد توجه مهندسی کنترل قرار گرفته است [۱-۶]. میراگر مغناطیسی MR شامل یک سیلندر هیدرولیکی میباشد که در آن ذرات معلق میکرونی قطبی شونده وجود دارند، می باشد. سیال در حالت عادی به طور آزاد جریان دارد و زمانی که در معرض یک محیط مغناطیسی قرار می گیرد، به یک ماده نیمه جامد تبدیل می شود [۷]. این قابلیت ها سیستم کنترل نیمه فعال را به یک سیستم کارآمد که مزایای هر دو سیستم فعال و مقاوم را در بردارد، تبدیل می کند. هدف این پژوهش دستیابی به یک سیستم کنترلی مناسب جهت کاهش پاسخ های سازه می باشد. روشهای مرسوم کنترل سازه به دو دسته کنترل کلاسیک و کنترل هوشمند تقسیم می شوند. منطق فازی که نوعی کنترل هوشمند به حساب می آید توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۸-۱۱]. Dyke و همکاران کنترل کننده قطع و وصل بهینه^۱ و قطع و وصل بهینه اصلاح شده^۲ را بر روی سازه خود مورد ارزیابی قرار دادند [۱۲]. پتانسیل راهبرد فازی توسط Battaini و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۱۳]. توانایی این رویکرد در تعامل با رفتار غیرخطی سازه است. Symans و همکاران عملکرد سیستم فازی در یک پل مجهز به جداساز را مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. مطالعات آنها نشان داد که این کنترل کننده توانایی کنترل جایجایی عرشه پل را دارد. عملکرد یک سازه محک ۵ طبقه مجهز به میراگر تنظیم شده جرم فعال که در آن از یک منطق فازی استفاده شده بود، توسط Samali و همکاران مود تحلیل و ارزیابی قرار گرفت [۱۵]. نتایج طراحی آنها نشان از کارآمدی کنترل کننده فازی در کاهش پاسخ های سازه در نسبت های مختلف فرکانسی دارد. بزرگووار و همکاران به منظور کاهش پاسخ های سازه ای محک، از یک کنترل کننده عصبی-فازی تطبیق پذیر (ANFIS) که ضرایب آن توسط الگوریتم ژنتیک بهینه سازی شده بود، استفاده کردند [۱۶]. ورودی کنترل کننده فازی آنها مقادیر تغییر مکان نسبی و شتاب طبقه بود. آنها نشان دادند که کنترل کننده آنها قادر به کاهش ۳۹ درصدی جایجایی دارد. آزادوار و همکاران یک کنترل کننده فازی نوع ۱ را با هدف کاهش شاخص اسیب در سازه طراحی کردند [۱۷]. کنترل کننده

^۱ Clipped Optimal Control

^۲ Modified Clipped Optimal Control

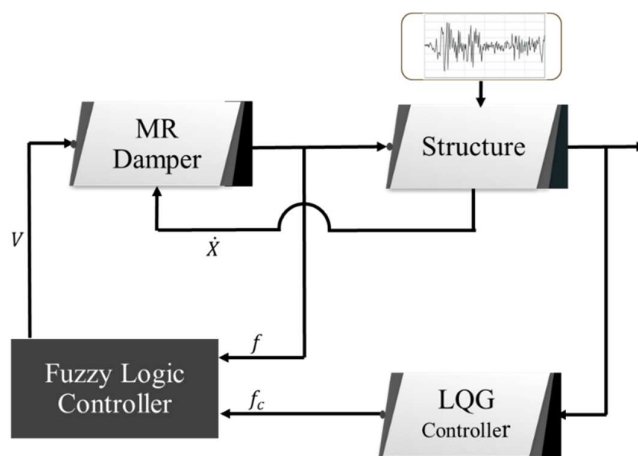
پیشنهادی آنها کاهش میزان آسیب در سازه را به میزان ۱۵ تا ۲۰ درصد در مقایسه با سایر کنترل کننده ها نشان داد. در هر یک از تحقیقات یاد شده، سعی در کنترل پاسخهای سازه و بهبود عملکرد لرزه ای سازه دارند. در این مقاله به منظور کاهش پاسخ های سازه، از کنترل کننده فازی در هر طبقه استفاده شده است. ورودی این کنترل کننده نیروی تولید شده توسط کنترل کننده خطی LQG و نیروی گام قبل همان طبقه می باشد.

۲. سازه محک مورد مطالعه

سازه مورد مطالعه در این مقاله توسط اتوری و همکاران [۱۸] ارائه شده است. ابعاد پلان این سازه ۳۶/۵۸ متر در ۵۴/۸۷ متری باشد. ارتفاع هر طبقه ۳/۹۶ متر و ارتفاع کلی ساختمان ۱۱/۹۶ متر می باشد. سیستم قاب این سازه از نوع خمشی می باشد که توسط میراگرهای مغناطیسی MR مجهز شده است. در این سازه به دلیل محدودیت در ظرفیت میراگر MR، سه محرک در طبقه اول و دو محرک در طبقات دوم و سوم به کار گرفته شده است. شتاب نگاشت های ال سنترو، هاجینوهه، نورثریج و کوبه به دلیل ویژگی های خاص و محتوای فرکانسی متفاوت آنها استفاده شده است. در هر طبقه دو سنسور تعبیه شده که وظیفه اندازه گیری نیرو و شتاب طبقات را بر عهده دارند.

۳. کنترل کننده LQG همراه با یک سیستم فازی^۱

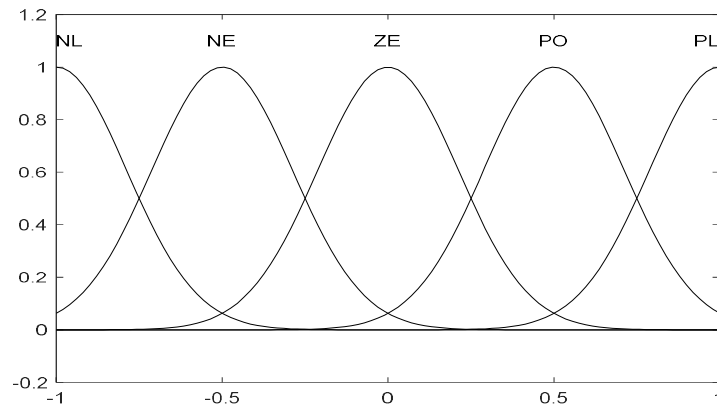
در ریاضیات تئوری کنترل کلاسیک بسیار به مقادیر دقیق وابسته است و نیازمند شاخه ای از ریاضیات مقادیر مبهم یا فازی هستیم که تئوری احتمالات برای آنها کارساز نیست. بهره جویی از یک سیستم استنتاج فازی در کنترل کننده ها و نتایج مثبت آن ها، پژوهشگران را به استفاده از این کنترل کننده سوق داده است. در این پژوهش، طراحی کنترل کننده فازی ممدانی براساس نیروی گام قبل و نیروی مطلوب تولید شده توسط یک کنترل کننده خطی LQG مدنظر است. در هر طبقه یک کنترل کننده فازی قرار داده شده است که وظیفه تولید ولتاژ مورد نیاز میراگر را بر عهده دارد. طرح کلی کنترل کننده پیشنهادی در شکل ۱ به نمایش در آمده است. توابع عضویت^۲ ورودی هر دو سیستم یکسان و دارای ۵ تابع عضویت از نوع گوسی می باشند که در شکل ۲ آمده است. توابع خروجی نیز دارای ۴ تابع عضویت و از نوع گوسی می باشند که در شکل ۳ به تصویر در آمده اند.



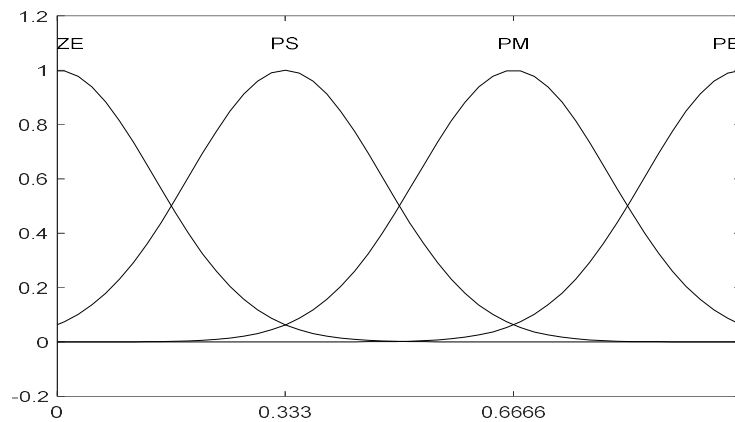
شکل ۱- راهبرد کنترل

^۱ LQG with fuzzy (LWF)

^۲ Membership functions



شکل ۲- توابع عضویت ورودی



شکل ۳- توابع عضویت خروجی

در این سیستم قوانین فازی براساس دانش بشری نوشته می‌شوند. در این مقاله این قوانین فازی براساس مفاهیم کنترل کننده قطع و وصل بهینه یا به اختصار LWF1 و قطع و وصل بهینه اصلاح شده یا LWF2 نوشته می‌شوند. مجموعه قوانین فازی در جدول ۱ و ۲ به تصویر درآمده‌اند.

جدول ۱- پایگاه قوانین فازی LWF1

F measured					
F desired	NL	NE	ZE	PO	PL
NL	PB	PB	PB	ZE	ZE
NE	ZE	PB	PB	ZE	ZE
ZE	ZE	ZE	PB	ZE	ZE
PO	ZE	ZE	PB	PB	ZE
PL	ZE	ZE	PB	PB	PB

جدول ۲- پایگاه قوانین فازی LWF2

F measured					
F desired	NL	NE	ZE	PO	PL
NL	PB	PB	PM	PS	ZE
NE	PM	PM	PM	PS	ZE
ZE	PS	PS	ZE	PS	PS
PO	ZE	PS	PM	PM	PM
PL	ZE	PS	PM	PB	PB

جدول ۳- مفاهیم مربوط به متغیرهای ورودی و خروجی

توابع عضویت			
ورودی		خروجی	
متغیر	تعریف	متغیر	تعریف
NL	Negative Large	PB	Positive Big
NE	Negative	PM	Positive Medium
ZE	Zero	PS	Positive Small
PO	Positive	ZE	Zero
PL	Positive Large		

۴. مدل میراگر MR

مدل سازی مناسب دستگاه کنترلی برای پیش بینی رفتار سیستم از اهمیت بالایی برخوردار است. یک مدل ساده مکانیکی براساس مدل بوک-ون در کنار یک میراگر ویسکوز برای مدل سازی دقیق رفتار برشی میراگر MR پیشنهاد شده است [۱۹, ۲۰]. معادلات حاکم بر این مدل به شرح زیر است:

$$f = c_0 \dot{x} + \alpha z \quad (1)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (2)$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u \quad (3)$$

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b} u \quad (4)$$

در این روابط x جابجائی نسبی دو سر میراگر و z متغیر تکاملی وابسته به تاریخچه پاسخ می باشد. با استفاده از پارامترهای β و γ می توان شیب رفتار خطی و همچنین انحنای ناحیه ی گذر از خطی به غیر خطی را تغییر داد. خروجی جریان مدار الکتریکی توسط رابطه ۵ تعیین می شود.

$$\dot{u} = -\eta(u-v) \quad (5)$$

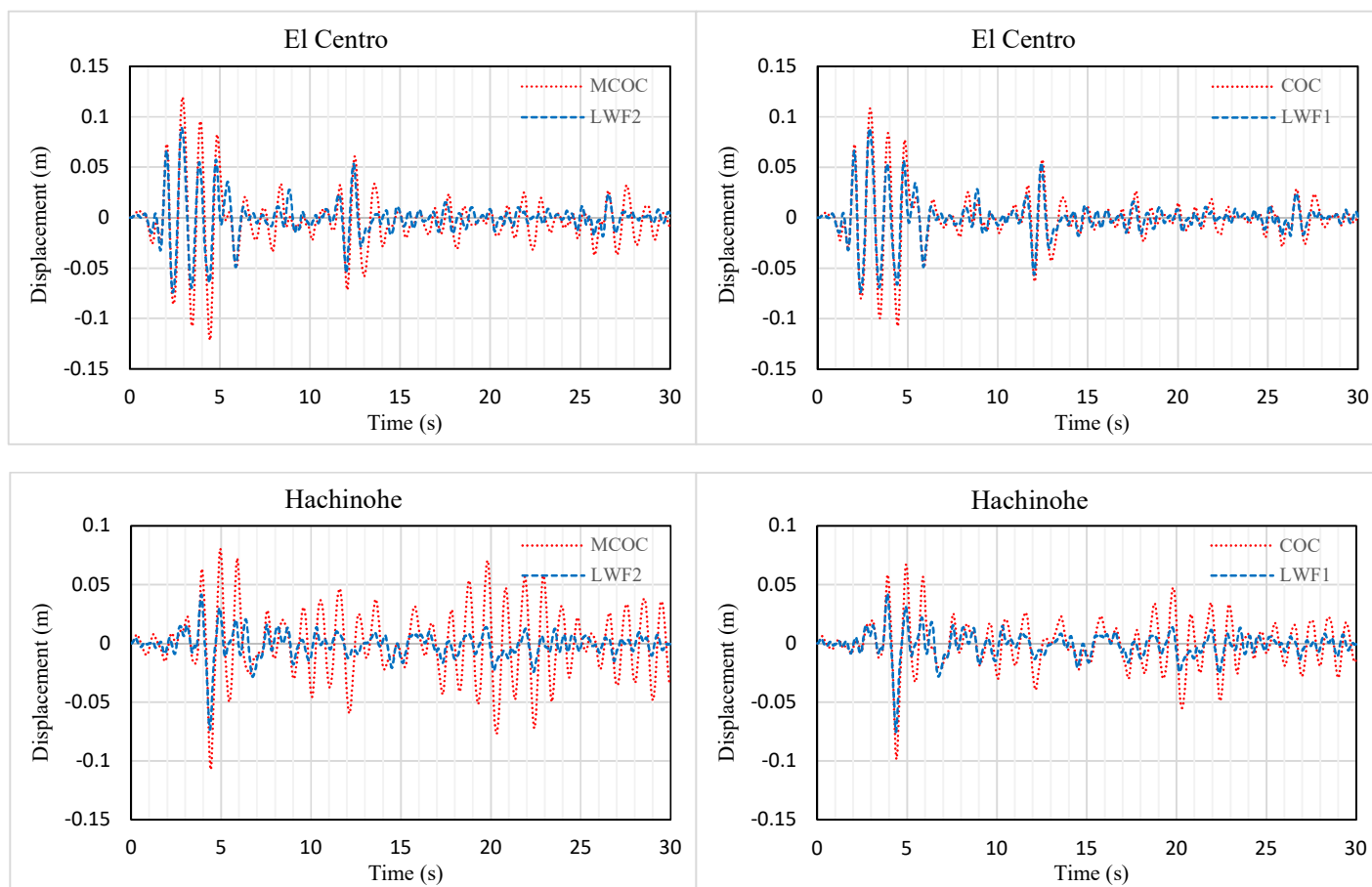
ظرفیت میراگر انتخاب شده ۱۰۰۰ کیلو نیوتن و مشخصات مکانیکی این معادلات در جدول ۴ ارائه شده است:

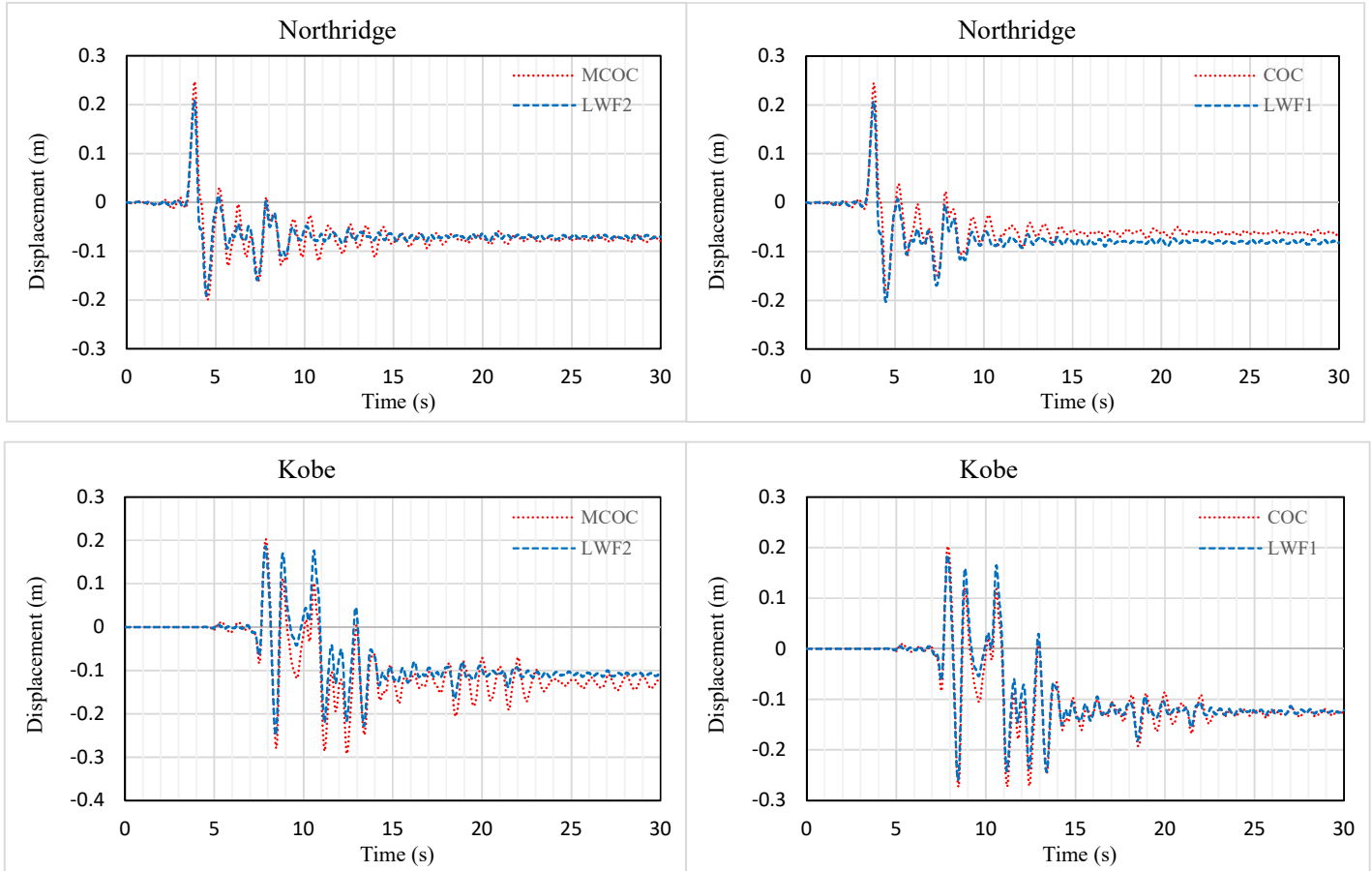
جدول ۴- مشخصات مکانیکی میراگر مغناطیسی MR

parameter	Value	parameter	Value	parameter	Value
α_a	1.0872e5 N/m	c_{0b}	$44.0 \frac{N \cdot s}{cm \cdot V}$	γ	3 cm^{-1}
α_b	4.9616e5 N/(cm V)	A	1.2	β	$\beta=3 \text{ cm}^{-1}$
c_{0a}	4.40 N s/cm	n	1	η	50 n^{-1}

۵. عملکرد کنترلی

عملکرد کنترل کننده فازی پیشنهادی نسبت به مدل های کنترل کننده قطع و وصل بهینه و قطع و وصل بهینه اصلاح شده در چهار زلزله ال سترو، هاجینوهه، نورثریج و کوبه با شدت ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۴ عملکرد هر کنترل کننده با مدل فازی آن مقایسه شده است. در این مقایسه از تاریخچه جابجایی طبقه سوم به دلیل اهمیت این پارامتر در مهندسی عمران، استفاده می شود.





شکل ۴- مقایسه جابجایی طبقه سوم در حالت های MCOC, LWF1, COC و LWF2

در جدول ۵ معیارهای ارزیابی (J1-J6) رای بررسی رفتار کنترل کننده و مقایسه ساده تر آن با سایر کنترل کننده ها برای این سازه تعریف شده است [۲۱]. در این روابط مقادیر جابجایی نسبی، شتاب طبقات و برش پایه در حالت کنترل شده به کنترل نشده مورد محاسبه قرار گرفته است. در این معیارها از زلزله ال سنترو و هاجینوهه با شدت های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ و زلزله های کوبه و نرتریج با شدت های ۰/۵ و ۱ استفاده شده است.

جدول ۵- معیارهای ارزیابی سازه

Interstory drift ratio	Level acceleration	Base shear
$J_1 = \max_{\substack{\text{ElCentro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left \frac{d_i(t)}{h_i} \right }{\delta_{\max}} \right\}$	$J_2 = \max_{\substack{\text{ElCentro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \ddot{x}_{ai}(t) }{\ddot{x}_{ai}^{\max}} \right\}$	$J_3 = \max_{\substack{\text{ElCentro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_i \sum_i m \ddot{x}_{ai}(t) }{F_b^{\max}} \right\}$
Normed interstory drift	Normed Level acceleration	Normed base shear
$J_4 = \max_{\substack{\text{ElCentro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left \frac{d_i(t)}{h_i} \right }{\delta_{\max}} \right\}$	$J_2 = \max_{\substack{\text{ElCentro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \ddot{x}_{ai}(t) }{\ddot{x}_{ai}^{\max}} \right\}$	$J_3 = \max_{\substack{\text{ElCentro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_i \sum_i m \ddot{x}_{ai}(t) }{ F_b^{\max} } \right\}$

Controller	Elcentro			Hachinohe			Northridge		Kobe		AVG	
	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	0.5	1	0.5	1		
J1	COC	0.473	0.713	0.85	0.59	0.738	0.77	0.697	0.942	0.874	0.84	0.748
	LWF1	0.402	0.553	0.827	0.3127	0.555	0.667	0.55	0.8	0.97	0.698	0.635
	MCOC	0.602	0.795	0.849	0.684	0.814	0.845	0.761	0.954	0.891	0.923	0.811
	LWF2	0.383	0.559	0.829	0.3188	0.536	0.649	0.551	0.813	0.975	0.66	0.627
J2	COC	0.704	0.751	0.981	0.766	0.943	0.997	0.92	0.965	0.869	0.876	0.877
	LWF1	0.676	0.784	0.979	0.5305	0.756	1.044	0.845	1.033	0.891	0.795	0.833
	MCOC	0.695	0.779	0.947	0.796	0.959	0.935	0.858	0.98	0.823	0.845	0.861
	LWF2	0.663	0.796	1.008	0.56	0.74	1.033	0.854	0.996	0.9	0.792	0.83
J3	COC	0.581	1.039	1.038	0.527	0.829	0.955	0.917	0.945	0.981	0.982	0.883
	LWF1	0.458	0.806	1.055	0.5336	0.719	0.978	0.907	0.996	1.002	0.989	0.845
	MCOC	0.632	1.004	0.984	0.605	0.826	0.961	0.939	0.95	0.895	0.959	0.875
	LWF2	0.439	0.819	1.057	0.542	0.737	0.974	0.901	0.991	1.03	0.977	0.847
J4	COC	0.477	0.556	0.458	0.257	0.341	0.759	0.462	0.733	0.45	1.101	0.589
	LWF1	0.338	0.428	0.442	0.149	0.192	0.303	0.108	0.946	1.226	1.053	0.518
	MCOC	0.614	0.656	0.602	0.459	0.492	1.045	0.605	0.91	0.854	1.083	0.731
	LWF2	0.32	0.427	0.444	0.149	0.19	0.276	0.107	0.866	1.029	0.955	0.502
J5	COC	0.563	0.62	0.663	0.403	0.411	0.512	0.627	0.646	0.567	0.656	0.573
	LWF1	0.599	0.636	0.664	0.3491	0.34	0.401	0.577	0.651	0.552	0.647	0.542
	MCOC	0.636	0.736	0.71	0.478	0.549	0.633	0.661	0.686	0.616	0.697	0.640
	LWF2	0.567	0.639	0.667	0.339	0.339	0.398	0.579	0.645	0.548	0.641	0.536
J6	COC	0.545	0.666	0.649	0.331	0.426	0.524	0.694	0.681	0.565	0.665	0.573
	LWF1	0.616	0.652	0.668	0.3531	0.356	0.421	0.664	0.706	0.568	0.694	0.57
	MCOC	0.575	0.75	0.743	0.637	0.61	0.82	0.723	0.706	0.604	0.696	0.645
	LWF2	0.579	0.652	0.673	0.342	0.357	0.42	0.66	0.699	0.569	0.69	0.564

۶. نتیجه گیری

هر دو کنترل کننده فازی پیشنهادی قادر به کاهش مقادیر جابجایی طبقه سوم سازه بودند. در این بین عملکرد کنترل کننده فازی در زلزله هاجینوهه و ال سنترو بهتر از دو زلزله دیگر بود. کنترل کننده فازی LWF1 کاهش ۲ تا ۴۷ درصدی معیار ارزیابی J1 را به ثبت رسانده است. در این بین کنترل کننده پیشنهادی بهترین عملکرد را در زلزله هاجینوهه با کاهش ۴۷ درصدی این معیار نشان می دهد. از طرفی کنترل کننده فازی LWF2 نیز معیار J1 را بین ۲ تا ۵۳ درصد کاهش داده است. مطابق انتظار بهترین عملکرد این کنترل کننده در زلزله هاجینوهه بوده است. نتایج معیارهای ارزیابی نشان می دهد که کنترل

کننده فازی LWF2 عملکرد بهتری نسبت به LWF1 داشته است. مقدار میانگین معیار J1 و J4 برای کنترل کننده LWF2، ۰/۶۲۷ و ۰/۵۰۲ می باشد. از مقایسه این دو معیار با سایر کنترل کننده ها میتوان نتیجه گرفت که کنترل کننده پیشنهادی بهترین عملکرد را در کاهش جابجایی نسبی طبقات داشته است. مقادیر شتاب و نرم شتاب طبقات توسط دو معیار J2 و J5 مورد مقایسه قرار میگیرد. بهترین مقدار این دو معیار به ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۵۳۶ است که توسط کنترل کننده LWF2 به دست آمده است که نشان از کارایی سیستم در کاهش پاسخ شتاب و نرم شتاب طبقات دارد. برش پایه طبقات و نرم آن توسط معیارهای J3 و J6 ارزیابی میشود. مطابق انتظار کنترل کننده LWF2 قادر به کاهش برش پایه و نرم آن بوده است.

۷. مراجع

- [1] S. Dyke, B. Spencer Jr, M. Sain, and J. Carlson, "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction," *Smart materials and structures*, vol. 5, no. 5, p. 565, 1996.
- [2] F. Casciati, G. Magonette, and F. Marazzi, *Technology of semiactive devices and applications in vibration mitigation*. John Wiley & Sons, 2006.
- [3] R. L. Sack and W. Patten, "Semiactive hydraulic structural control," in *Proceedings of the International Workshop on Structural Control*, 1994: University of Southern California Los Angeles, pp. 417-431.
- [4] O. Yoshida and S. J. Dyke, "Seismic control of a nonlinear benchmark building using smart dampers," *Journal of engineering mechanics*, vol. 130, no. 4, pp. 386-392, 2004.
- [5] H. Jagadisha and V. S. Rao, "Classical PID Controller for Semi-active Vibration Control of Seismically Excited Structure Using Magneto-Rheological Damper," in *Global Challenges in Energy and Environment: Springer*, 2020, pp. 201-210.
- [6] A. Yanik, "Seismic control performance indices for magneto-rheological dampers considering simple soil-structure interaction," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 129, p. 105964, 2020.
- [7] S. Chu, T. T. Soong, and A. M. Reinhorn, *Active, hybrid, and semi-active structural control: A design and implementation handbook*. Wiley New York, 2005.
- [8] K. M. Choi, S. W. Cho, H. J. Jung, and I. W. Lee, "Semi-active fuzzy control for seismic response reduction using magnetorheological dampers," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 33, no. 6, pp. 723-736, 2004.
- [9] H.-S. Kim and P. N. Roschke, "GA-fuzzy control of smart base isolated benchmark building using supervisory control technique," *Advances in Engineering Software*, vol. 38, no. 7, pp. 453-465, 2007.
- [10] M. Bhardwaj and T. Datta, "Semiactive fuzzy control of the seismic response of building frames," *Journal of Structural Engineering*, vol. 132, no. 5, pp. 791-799, 2006.
- [11] Z.-D. Xu and Y.-Q. Guo, "Neuro-fuzzy control strategy for earthquake-excited nonlinear magnetorheological structures," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 28, no. 9, pp. 717-727, 2008.
- [12] B. Spencer, S. Dyke, and M. K. Sain, "Magnetorheological dampers: a new approach to seismic protection of structures," in *Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control*, 1996, vol. 1: IEEE, pp. 676-681.
- [13] M. Battaini, F. Casciati, and L. Faravelli, "Fuzzy control of structural vibration. An active mass system driven by a fuzzy controller," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 27, no. 11, pp. 1267-1276, 1998.
- [14] M. D. Symans and S. W. Kelly, "Fuzzy logic control of bridge structures using intelligent semi-active seismic isolation systems," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 28, no. 1, pp. 37-60, 1999.
- [15] B. Samali and M. Al-Dawod, "Performance of a five-storey benchmark model using an active tuned mass damper and a fuzzy controller," *Engineering Structures*, vol. 25, no. 13, pp. 1597-1610, 2003.
- [16] M. Bozorgvar and S. M. Zahrai, "Semi-active seismic control of a 9-story benchmark building using adaptive neural-fuzzy inference system and fuzzy cooperative coevolution," *SMART STRUCTURES AND SYSTEMS*, vol. 23, no. 1, pp. 1-14, 2019.
- [17] M. Azadvar, H. Hajkazemi, and A. Karamodin, "A Study on the Optimization of the Performance of Type 1 Fuzzy Controller Based on the IDA Method," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, vol. 43, no. 4, pp. 807-819, 2019.
- [18] Y. Ohtori, R. Christenson, B. Spencer Jr, and S. Dyke, "Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 130, no. 4, pp. 366-385, 2004.
- [19] S. J. Dyke, F. Yi, S. Frech, and J. D. Carlson, "Application of Magnetorheological Dampers to Seismically Excited Structures,# 361," in *Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference*, 1999, vol. 3727, p. 410.
- [20] B. Spencer Jr, S. Dyke, M. Sain, and J. Carlson, "Phenomenological model for magnetorheological dampers," *Journal of engineering mechanics*, vol. 123, no. 3, pp. 230-238, 1997.
- [21] F. Yi, S. J. Dyke, J. M. Caicedo, and J. D. Carlson, "Seismic response control using smart dampers," in *Proceedings of the 1999 American Control Conference (Cat. No. 99CH36251)*, 1999, vol. 2: IEEE, pp. 1022-1026.