

کنترل بهینه ساختمانهای مجهز به میراگر MR با استفاده از شبکه عصبی فازی ANFIS

امیر فایضی^۱، حمید محرمی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

*hamid.moharrami@gmail.com

تاریخ پذیرش: [۴۴۴۴۴۴]

تاریخ دریافت: [۴۴۴۴۴۴]

چکیده- کاربرد میراگرهای MR به دلیل ظرفیت بالا و مصرف انرژی کم، امروزه در جهت کنترل پاسخهای لرزه‌ای سازه‌ها گسترش فراوانی پیدا کرده است. لذا ارائه روشهای کنترلی هرچه دقیقتر و نزدیکتر به فیزیک واقعی مسئله (عوامل غیرخطی، عدم قطعیتها و ...) مهندسین را در به کارگیری هرچه مفیدتر این نوع میراگر یاری می‌نماید. در این مقاله به منظور دست یافتن به کنترل گری که بتواند در حین زلزله ولتاژهای ورودی به میراگرهای MR را هرچه سریعتر و دقیقتر تعیین نماید، رهیافت کنترلی بهینه‌ای برای ساختمانهای مجهز به میراگر MR با استفاده از شبکه عصبی فازی ANFIS ارائه گشته است. نشان داده شده است که با به کارگیری این روش می‌توان به سرعت و با دقت ولتاژهای بهینه میراگرها را در حین وقوع زلزله تعیین نمود. برای نشان دادن تأثیر پارامترهای موجود در تابع هدف و مقایسه کارایی این کنترل گر نسبت به روشهای معمول پیشین، دو مثال عددی مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج حاصل از کنترل، کاهش مناسبی را در جابجایی های جانبی نسبی، شتابهای مطلق و برش پایه نشان می دهند و همچنین طراح کنترل گر را در تعیین ضرایب تابع هدف راهنمایی می کند تا بتواند کاهش مناسبی را در تمام معیارهای استاندارد دلخواه داشته باشد.

واژگان کلیدی- کنترل بهینه، میراگر MR، ANFIS، تابع هدف ترکیبی، قاب برشی تحت زلزله.

۱- مقدمه

یکی از مهمترین مسایل مهندسی سازه، مقابله با بارهای جانبی (از قبیل زلزله، باد و ...) می‌باشد. در سالهای اخیر تلاش‌های زیادی به منظور افزایش مقاومت جانبی ساختمان در مرحله طراحی و بهسازی لرزه‌ای بعد از ساخت به عمل آمده است. کنترل سازه یکی از موارد یاد شده است. در روش کنترل نیمه فعال نیرویی که تجهیزات کنترل نیمه فعال ایجاد می‌کنند یک نیروی مقاوم بوده و با صرف

انرژی کمی (برای مثال در حد یک باتری برای میراگرهای^۱ MR) در یک فرآیند هوشمند، در سیستم استهلاك انرژی سازه تغییراتی ایجاد می‌کنند تا قسمتی از انرژی حاصل از بارگذاری زلزله را جذب سیستم استهلاك انرژی کنند. روش کنترل نیمه فعال به دلیل انعطاف و کارایی بالا و نیاز به منابع انرژی کمتر به سرعت در حال توسعه می‌باشد. یکی از پر کاربردترین وسایل مورد استفاده برای کنترل

۱. Magneto-Rheological

یک تابع هدف می باشد تا مقادیر متغیر کنترل با توجه به آن و روش انتخاب شده محاسبه گردند. انتخاب تابع هدفی کلی تر و در عین حال دارای جزئیات بیشتر، اختیار عمل بیشتری به طراح خواهد داد. در این مقاله ابتدا تابع هدف جدیدی (J) به گونه ای پیشنهاد گشته است که معیارهای مربوط به کاهش تغییر مکان جانبی نسبی، شتاب مطلق و انرژی جذب شده توسط اعضای سازه ای طبقات و همچنین کاهش ولتاژ اعمالی به میراگرها را دربر دارد. سپس به منظور محاسبه دقیق و مستقیم نیروی ایجاد شده توسط میراگر MR، معادلات مربوط به رفتار میراگر به صورت درگیر^۶ با معادلات حرکت سازه در نظر گرفته شده و از روش کنترل بهینه محرمی- فایضی [۴۳] برای محاسبه ولتاژهای بهینه استفاده گردیده است. در این روش مقادیر ولتاژهای بهینه به صورت عددی برای هر زلزله مشخص حاصل می گردد به نحوی که دو نکته گفته شده در بالا برای تغییرات نرم نیروهای ایجاد شده و خلاف جهت بودن آن با سرعت نسبی دو انتهای میراگر در آن، رعایت شود. در نهایت با استفاده از پاسخهای عددی حاصل از کنترل بهینه، چند شبکه عصبی- فازی ANFIS موازی به عنوان یک کنترل گر مجتمع که روند کنترلی بهینه و مدل معکوس میراگر را توأمأ در خود جای داده است آموزش داده شده اند.

۲- مدل میراگر MR

در این مقاله مدل Bouc-Wen برای رفتار میراگر MR استفاده شده که توسط Yi و همکاران به صورت معادلات زیر ارائه شده است [۹]

$$f_{damp} = c_0 \dot{x} + \alpha z \quad (۱-الف)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{N-1} - \beta \dot{x} |z|^N + A \dot{x} \quad (۱-ب)$$

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b} u, \quad \alpha = \alpha_a + \alpha_b u \quad (ج-۱)$$

$$\dot{u} = -\eta(u - V) \quad (د-۱)$$

V. Coupled

نیمه فعال میراگرهای MR می باشند که متشکلند از پیستون، سیلندر حاوی سیال MR، کوئل^۱ و انباشتگر^۲ [۱]. تا کنون مدل های مختلفی برای رفتار دینامیکی غیرخطی میراگر MR، از قبیل Bingham، Gamota and Modified Bouc-Wen و Filisko، Bouc-Wen بیان گشته است [۲].

برای طراحی کنترل گر بدون دخیل کردن پیچیدگیهای مربوط به غیرخطی بودن معادلات دینامیکی رفتار دینامیکی میراگر، چندین روش پیشنهاد گشته است [۵-۱۳] که در همگی آنها این دو نکته به گونه ای لحاظ شده اند: (۱) جهت نیروی ایجاد شده توسط میراگر خلاف جهت سرعت نسبی دو انتهای میراگر می باشد و (۲) تغییرات نیروی ایجاد شده در مقابل تغییرات ولتاژ، آنی نبوده و به شکلی نرم صورت می گیرد. همچنین روشهای جدیدتری ارائه گشته اند که ابتدا نیروی مورد نیاز به یکی از روشهای معمول (LQR, LQG, H_۲, H_∞, ...) بدست آورده می شود و سپس از مدل معکوس^۳ میراگر برای محاسبه ولتاژ متناظر استفاده می گردد. انواع مختلفی از شبکه های عصبی و شبکه های عصبی- فازی با معماری^۴ های مختلف و روشهای مختلف برای تنظیم پارامترهای موجود در آنها توسط محققان برای بیان عددی مدل مستقیم^۵ و مدل معکوس میراگر ارائه شده است [۱۴-۱۹]. تحقیقات زیادی نیز برای آنکه کنترل گر طراحی شده در مقابل عدم قطعیت های موجود در زلزله مقاوم^۶ بوده و بتواند با سرعت و با دقت بالا در حین وقوع زلزله دستورات کنترلی را صادر نماید انجام شده است که در آنها از شبکه های عصبی و منطق فازی به صورت مجزا یا توأم استفاده شده است [۲۰-۲۹]. توابع هدف استاندارد جهت ارزیابی روش کنترلی اتخاذ شده، توسط Ohtori Y. و همکاران بیان شده است [۳۲].

به طور کلی برای طراحی یک کنترل گر نیاز به

۱. Coil

۲. Accumulator

۳. Inverse Model

۴. Architecture

۵. Forward Model

۶. Robust

بردار جابجایی، سرعت و شتاب درجات آزادی سیستم نسبت به زمین، $\ddot{v}_g$ شتاب پایه و $\{1\}$ برداری با مقادیر ۱ می-باشد. ماتریس میرایی نیز به صورت زیر بدست آورده شده است [۳۳]

$$C_S = M_S \left(\sum_{i=1}^n \frac{2\xi_i \omega_i}{\phi_i^T M_S \phi_i} \phi_i \phi_i^T \right) M_S \quad (۳)$$

که در آن ξ_i ضریب میرایی، ω_i^2 و ϕ_i به ترتیب مقدار و بردار ویژه ماتریس $M_S^{-1} K_S$ در مد نوسان i ام و n تعداد درجات آزادی سیستم می-باشد. برای تحلیل سازه کنترل شده توسط میراگر بایستی که معادله حرکت سازه و معادلات مربوط به دینامیک میراگر به طور همزمان حل گردند

$$K_S v + C_S \dot{v} + M_S \ddot{v} + D f_d = -M_S \{1\} \ddot{v}_g \quad (۴-الف)$$

$$f_{dj} = (c_{0aj} + c_{0bj} u_j) \dot{x}_j + (\alpha_{aj} + \alpha_{bj} u_j) z_j, \quad (۴-ب)$$

$$j = 1 \sim m$$

$$\dot{z}_j = -\gamma_j |\dot{x}_j| z_j |z_j|^{N_j-1} - \beta_j \dot{x}_j |z_j|^{N_j} + A_j \dot{x}_j \quad (۴-ج)$$

$$\dot{u}_j = -\eta_j (u_j - V_j) \quad (۴-د)$$

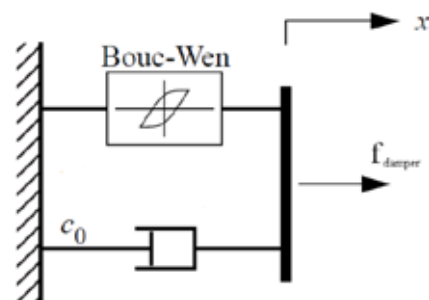
که در آن f_d بردار نیروهای میراگرها، D ماتریس اثر مربوط به تعداد و مکان قرارگیری میراگرها، $\dot{x}$ بردار سرعت نسبی دو سر میراگرها $E_{k,i} \dot{v}_i$ ، k عدد طبقه ایست که میراگر زام در آن قرار گرفته، m تعداد طبقاتی است که میراگر در آن‌ها قرار گرفته، زیرنویس j مربوط به میراگر زام E به صورت زیر تعریف شده است.

$$E = \begin{cases} E_{i,i} = 1, & i = 1 \sim n \\ E_{i,i-1} = -1, & i = 2 \sim n \\ E_{i,j} = 0, & i, j = 1 \sim n, j \neq i, i-1 \end{cases}$$

۴- توابع هدف استاندارد و تابع هدف پیشنهادی

در ادبیات علمی توابع هدف استاندارد که جابجایی جانبی نسبی، شتاب مطلق طبقات و برش پایه را در

که در آن f_{damp} نیروی ایجاد شده توسط میراگر، $\dot{x}$ سرعت نسبی دو انتهای میراگر، u ولتاژ واقعی و V ولتاژ ورودی به میراگر است. z متغیر مربوط به رفتار هیسترتیک می باشد که در واقع مشخص کننده وضعیت داخلی میراگر است و به واسطه معادله (۱-ب) دارای حافظه است؛ به عبارت دیگر این متغیر وضعیت های پیشین را در خود جای داده است (برای توضیحات بیشتر در مورد z ر. ک. [۳۰]). پارامترهای $\gamma, N, \beta, A, c_a, c_b, \alpha_a, b_a$ و η از تنظیم شدن معادلات (۱) با نتایج حاصل از آزمایشات لرزه‌ای روی میراگر در آزمایشگاه بدست می آیند. معادله (۱-د) یک فیلتر مرتبه یک^۱ می باشد که به دلیل در نظر گرفتن دینامیک حاصل از وجود مقاومت و القا در مدار مغناطیسی میراگر MR به کار رفته است. همان طور که در شکل ۱ دیده می شود، نیروی میراگر در این مدل به شکل میرایی لزج و رفتار هیسترتیک Bouc-Wen که به صورت موازی کار می کنند پیشنهاد شده است.



شکل ۱. مدل مکانیکی میراگر [۹].

۳- معادلات حرکت سازه مجهز به میراگرهای MR

معادله حرکت یک سیستم سازه‌ای تحت تحریک شتاب زلزله به صورت زیر می باشد

$$K_S v + C_S \dot{v} + M_S \ddot{v} = -M_S \{1\} \ddot{v}_g \quad (۲)$$

که در آن C_S, K_S و M_S به ترتیب ماتریس سختی، میرایی و جرم کل سازه، $\dot{v}$ و $\ddot{v}$ نیز به ترتیب

۱. First Order Filter

$$\begin{cases} (Q_v)_{i,i} = \frac{1}{h_i^2} + \frac{1}{h_{i+1}^2}, i=1 \sim n \\ (Q_v)_{i+1,i} = (Q_v)_{i,i+1} = -\frac{1}{h_{i+1}^2}, i=1 \sim n-1 \\ (Q_v)_{i+j,i} = (Q_v)_{i,i+j} = 0, 2 \leq j \leq n-i \end{cases}$$

$$Q'_v = \frac{1}{n^*(t_f - t_0)^* \left(\max_{t,i} |\ddot{v}_{ai}^u(t)| \right)^2} Q_v,$$

$$Q_{\ddot{v}} = Identity_n$$

$$M'_S = \frac{1}{E_I} M_S, C'_S = \frac{1}{E_I} C_S, K'_S = \frac{1}{E_I} K_S$$

$$E_I = n^*(t_f - t_0)^*$$

$$\left(\max_t |(v^u)^T (-M_S \ddot{v}_a^u + C_S \dot{v}^u + K_S v^u)| \right)$$

که Q'_v و Q'_v به ترتیب ماتریس‌های نرمال شده مربوط به تغییر مکان جانبی نسبی و شتاب مطلق، Q_1 و Q_2 به ترتیب ضرایب اسکالری هستند که اهمیت تغییر مکان جانبی نسبی و شتاب مطلق را در تابع هدف نشان می‌دهند، C'_S, K'_S و M'_S به ترتیب ماتریس‌های سختی، میرایی و جرم نرمال شده، R ماتریس پسخور ورودی و E_I مقدار مورد استفاده برای نرمال کردن ماتریسهای C_S, K_S و M_S می‌باشد. جملات موجود در تابع هدف پیشنهادی (معادله (۶)) با توجه به موارد زیر پیشنهاد گشته اند:

الف) جمله $v^T Q'_v v$ که مربوط به جابجاییهای جانبی نسبی طبقات می‌شود. اگر از میانگین مجموع مربعات جابجاییهای جانبی نسبی طبقات، یعنی

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i - v_{i-1}}{h_i} \right)^2$$

میانگین زمانی در طول کل مدت زلزله نیز گرفته شود و سپس برای نرمال شدن تقسیم بر مقدار حداکثر جابجاییهای جانبی نسبی طبقات در حالت کنترل نشده بشود، آنگاه جمله زیر را که به شکل ماتریسی نوشته شده است خواهیم داشت:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ddot{v}_{ai})^2$$

نظر می‌گیرند به صورت زیر تعریف شده اند [۳۲]

$$J_1 = \frac{\max_{t,i} \frac{|d_i^c(t)|}{h_i}}{\max_{t,i} \frac{|d_i^u(t)|}{h_i}}, \quad J_4 = \frac{\max_i \frac{\|\ddot{d}_i^c(t)\|}{h_i}}{\max_i \frac{\|\ddot{d}_i^u(t)\|}{h_i}} \quad (5)$$

$$J_2 = \frac{\max_{t,i} \frac{\|\ddot{v}_{ai}^c(t)\|}{\max_{t,i} \|\ddot{v}_{ai}^u(t)\|}}{\max_{t,i} \frac{\|\ddot{v}_{ai}^c(t)\|}{\max_{t,i} \|\ddot{v}_{ai}^u(t)\|}}, \quad J_5 = \frac{\max_i \frac{\|\ddot{v}_{ai}^c(t)\|}{\max_i \|\ddot{v}_{ai}^u(t)\|}}{\max_i \frac{\|\ddot{v}_{ai}^c(t)\|}{\max_i \|\ddot{v}_{ai}^u(t)\|}}$$

$$J_3 = \frac{\max_t \left| \sum_i m_i \ddot{v}_{ai}^c(t) \right|}{\max_t \left| \sum_i m_i \ddot{v}_{ai}^u(t) \right|}, \quad J_6 = \frac{\left\| \sum_i m_i \ddot{v}_{ai}^c(t) \right\|}{\left\| \sum_i m_i \ddot{v}_{ai}^u(t) \right\|}$$

$$d_i(t) = v_i(t) - v_{i-1}(t), \quad \|\cdot\| = \sqrt{\frac{1}{t_f - t_0} \int_{t_0}^{t_f} (\cdot)^2 dt} \quad \text{که}$$

و در آن J_1 تا J_6 به ترتیب معیارهای مربوط به حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی طبقات، شتاب مطلق طبقات و برش پایه هستند و J_1 تا J_6 نیز به ترتیب عبارتند از معیارهای مربوط به میانگین زمانی تغییر مکان جانبی نسبی طبقات، شتاب مطلق طبقات و برش پایه. d_i تغییر مکان جانبی، h_i ارتفاع، $\ddot{v}_{ai}$ شتاب مطلق، m_i جرم، v_i جابجایی طبقه i ام، t_0 زمان شروع زلزله، t_f زمان خاتمه زلزله، $\|\cdot\|$ عملگر اسکالر نرم مرتبه دوم، زیر نویس i مربوط به طبقه i ام و بالا نویس‌های c و u به ترتیب بیانگر حالت کنترل شده و نشده می‌باشند. در شکل دهی به تابع هدف پیشنهادی، سعی بر آن بوده است که اکثر معیارهای گفته شده در سری معادلات (۵) به گونه‌ای که با روند کنترلی منطبق باشد، در نظر گرفته شود. تابع هدف پیشنهادی در این مقاله به صورت زیر می‌باشد

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \left(q_1 v^T Q'_v v + q_2 \ddot{v}_a^T Q'_{\ddot{v}} \ddot{v}_a + v^T (-M'_S \ddot{v}_a + C'_S \dot{v} + K'_S v) + v^T R v \right) dt \quad (6)$$

$$Q'_v = \frac{1}{n^*(t_f - t_0)^* \left(\max_{t,i} \frac{|d_i^u(t)|}{h_i} \right)^2} Q_v, \quad \text{که در آن}$$

اکثر به میراگر به مدت زیاد تعیین نمود. برای واضح تر شدن مسئله بایستی که تابع هدف مورد نظر همراه با تمام قیود رفتاری و اندازه‌ای سیستم به طور مناسب و همزمان در نظر گرفته شوند. به همین دلیل تابع هدف گفته شده در معادله (۶) و قیودی که در سری معادلات (۴)، بیان شده اند همگی برای یافتن تاریخچه زمانی بهینه ولتاژهای ورودی به میراگرها در برابر زلزله های مشخص در روش کنترل بهینه مشروح در مرجع [۳] به کار گرفته شده اند.

۵- رهیافت کنترل

در این مقاله برای مینیم کردن تابع هدف معادله (۶) با توجه به معادلات حرکت (۴)، از روش کنترل بهینه ای که توسط فایضی و محرمی [۳] ارائه گشته، استفاده شده است. در این روش برای مینیم شدن تابع هدف پیشنهادی (معادله (۶)) هفت معادله برداری دیفرانسیلی غیرخطی با استفاده الگوریتم ارائه شده برای یافتن تاریخچه زمانی ولتاژ بهینه حل می گردند. به این ترتیب برای یک ساختمان تحت تحریک شتاب زلزله های مشخص، تاریخچه زمانی ولتاژهای بهینه به همراه تاریخچه زمانی تمام جابجایی ها، سرعت ها و شتابها برای آن ساختمان و تحت آن زلزله ها به صورت عددی در اختیار خواهد بود. تعداد لحظاتی که این اطلاعات برای آن ها محاسبه می شوند وابسته به طول رکورد زلزله t_f و انتخاب گام زمانی حل عددی معادلات بهینه، Δt ، می باشد و به صورت $N_t = \text{Int}(h * t_f / \Delta t)$ محاسبه می گردد که در آن Int تابع جزء صحیح می باشد. مثلاً برای زلزله به طول ۲۰ ثانیه و گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه، به تعداد ۲۰۰۰ لحظه اطلاعات مربوط به سازه برای یک زلزله محاسبه و ذخیره می شوند. اکنون می توان از اطلاعات ذخیره شده برای یک یا چند زلزله به عنوان ورودی - خروجی مطلوب ANFIS استفاده کرد و آن را به عنوان یک کنترل گر آموزش داد. از آنجایی که ساختار ANFIS به صورت چند ورودی - یک خروجی می باشد، لذا به ازای هر طبقه ای دارای میراگر، یک کنترل گر ANFIS برای تمام میراگرهای موجود در آن طبقه با استفاده از جعبه ابزار Fuzzy

ب) جمله $\ddot{v}_a^T Q' \ddot{v}_a$ که مربوط به شتابهای مطلق طبقات می باشد. اگر از میانگین مجموع مربعات شتابهای مطلق طبقات، یعنی

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ddot{v}_{ai})^2$$

میانگین زمانی در طول کل مدت زلزله نیز گرفته شود و سپس برای نرمال شدن تقسیم بر مقدار حداکثر شتابهای مطلق طبقات در حالت کنترل نشده بشود، آنگاه جمله زیر را که به شکل ماتریسی نوشته شده است خواهیم داشت:

$$\int_{t_0}^{t_f} \ddot{v}_a^T Q' \ddot{v}_a dt$$

ج) جمله $v^T (-M' s \ddot{v}_a + C' s \dot{v} + K' s v)$ که مربوط به انرژی جذب شده توسط کل اعضای سازه ای منهای انرژی جذب شده توسط جرم طبقه به دلیل شتاب گرفتن می باشد. اگر از میانگین انرژی جذب شده توسط کل اعضای سازه ای منهای انرژی جذب شده توسط جرم طبقات، یعنی

$$\frac{1}{n} v^T (-M_s \ddot{v}_a + C_s \dot{v} + K_s v)$$

میانگین زمانی در طول کل مدت زلزله نیز گرفته شود و سپس برای نرمال شدن تقسیم بر مقدار حداکثر مطلق خود در حالت کنترل نشده بشود، آنگاه جمله زیر را خواهیم داشت:

$$\int_{t_0}^{t_f} v^T (-M' s \ddot{v}_a + C' s \dot{v} + K' s v) dt$$

منظور از این جمله در واقع این بوده است که انرژی ورودی زلزله به سازه بیشتر به شتاب تبدیل گردد و کمتر جذب خود اعضای سازه ای شود.

د) جمله $V^T R V$ که مربوط به ولتاژهای ورودی به میراگر می باشد. اگر ماتریس $R = \alpha I$ ، یعنی برابر ضریبی از ماتریس یک، فرض شود آنگاه ضریبی از انتگرال زمانی مجموع مربعات ولتاژهای ورودی به تمام میراگرها را در تابع هدف خواهیم داشت. می توان ضریب α را بسته به اهمیت آن نسبت به جملات دیگر و به منظور کاهش انرژی مصرفی توسط میراگر و همچنین جلوگیری اعمال ولتاژ حد

تحت شتاب دو زلزله Northridge و El-Centro به وسیله رهیافت کنترلی مشروح در این مقاله به طور جداگانه کنترل شده است. از پارامترهای مربوط به مدل رفتاری میراگر که از مقاله Karamodin و همکاران [۲۳] استخراج شده (جدول ۲) و مقادیر زیر برای تولید اطلاعات ورودی-خروجی مطلوب ANFIS استفاده گشته است:

$$R = 10^{-8}I, t_0 = 0, t_f = 20sec, \xi = 0.02$$

۲۰ ثانیه اول زلزله که حداکثر پاسخهای سازه‌ای زلزله‌های مورد بررسی در آن اتفاق می‌افتد برای تولید ولتاژهای بهینه در نظر گرفته شده است. همچنین میرایی ذاتی تمام مودهای سازه ۲٪ فرض گشته است. برای ماتریس پسخور ولتاژ نیز با سعی و خطا مقدار $10^{-8}I$ فرض شده تا از اعمال ولتاژ حد اکثر به میراگر به مدت زیاد جلوگیری شود و همچنین میراگر انرژی الکتریکی کمتری مصرف کند. جدول ۲ مشخصات میراگری را بیان می‌کند که ظرفیت ایجاد نیرویی برابر ۱۰۰۰ کیلو نیوتن را در هنگام اعمال ولتاژ حداکثر داراست.

جدول ۱. مشخصات ساختمان ۱۵ طبقه

تعداد میراگرها	سختی (*۱۰ ^۵) (کیلونیوتن بر متر)	جرم (تن) (متر)	ارتفاع (متر)	طبقه
۲	۷/۹۰۵	۳۶۷/۸	۴/۰۰	۱
۲	۷/۸۳۵	۳۶۷/۸	۳/۰۰	۲
۲	۷/۷۷۵	۳۴۱/۵	۳/۰۰	۳
۲	۷/۷۷۵	۳۴۱/۵	۳/۰۰	۴
۱	۷/۴۶۰	۲۸۵/۵	۳/۰۰	۵
۱	۷/۳۷۵	۲۴۶/۹	۳/۰۰	۶
۱	۷/۳۷۵	۲۴۶/۹	۳/۰۰	۷
۱	۷/۲۷۵	۲۳۲/۹	۳/۰۰	۸
۱	۷/۱۷۰	۱۷۶/۹	۳/۰۰	۹
۱	۷/۱۷۰	۱۷۶/۹	۳/۰۰	۱۰
۱	۶/۷۳۰	۱۵۲/۴	۳/۰۰	۱۱
۱	۶/۷۲۵	۱۲۷/۸	۳/۰۰	۱۲
۰	۶/۷۲۵	۱۲۶/۱	۳/۰۰	۱۳
۰	۶/۷۱۵	۹۲/۸	۳/۰۰	۱۴
۰	۶/۷۱۰	۷۷/۱	۳/۰۰	۱۵

Logic از نرم افزار MATLAB، آموزش داده شده است. این کنترل گرها در حین شبیه سازی کنترل سازه، به صورت موازی با یکدیگر عمل خواهند کرد. در نهایت شبیه سازی سازه، میراگرها و کنترل گرها توسط SIMULINK که یکی از نرم افزارهای موجود در MATLAB می باشد انجام شده است. به دلیل سرعت زیاد کنترل گر (در حد چند میلی ثانیه [۴]) در صدور دستورات کنترلی، از تأخیر زمانی مربوط به دستورات کنترلی صرف نظر شده است. همچنین برای جلوگیری از اشباع^۱ میراگر، مقادیر ولتاژهای خروجی کنترل گرها در ناحیه حداقل تا حداکثر ولتاژ مجاز میراگر محدود شده اند.

برای ارزیابی رهیافت کنترل نیز از معیارهای J_1 تا J_4 بیان شده در معادلات (۵) استفاده شده است. این رهیافت سه مزیت عمده را نسبت به کارهای پیشین داراست:

۱. از تابع هدف تقریباً کاملی (که اکثر پاسخهای مهم سازه در آن دیده شده) برای کنترل استفاده شده است. این تابع اختیار عمل بیشتری را برای طراح کنترل گر ایجاد می کند.

۲. ولتاژهای بهینه با در نظر گرفتن دینامیک میراگر و بدون هیچ پیش فرض محدود کننده ای برای سیگنال زلزله، در مقابل تمام لحظات طول زلزله بدست می آیند.

۳. از ویژگیهای قدرتمند شبکه‌های عصبی در یادگیری و از مزایای عمده منطق فازی در مدل کردن سیستمهای غیرخطی استفاده کرده و یک کنترل گر سریع و دقیق طراحی شده است.

۶- مثال عددی و نتایج مربوط به آن

در این بخش سعی بر آن است که با بررسی دو مثال عددی (۱) تأثیر پارامترهای مهم تابع هدف در کاهش پاسخهای سازه ای نشان داده شود و (۲) شایستگی و کارایی رهیافت کنترلی شرح داده شده در مقایسه با سازه کنترل نشده و کنترل شده به روشهای معمول گذشته بررسی گردد.

مثال اول

یک ساختمان ۱۵ طبقه (با مشخصات جدول ۱)

۱. Saturation

جدول ۲. مشخصات میراگر MR با مدل ساده Bouc-Wen

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
$\gamma \text{ cm}^{-1}$	β	$\gamma \text{ cm}^{-1}$	β
0.5 s^{-1}	η	0.5 s^{-1}	η
$44.0 \text{ N.s.cm}^{-1}.V^{-1}$	c_{0a}	$44.0 \text{ N.s.cm}^{-1}.V^{-1}$	c_{0b}
$4.9616e5 \text{ N.cm}^{-1}.V^{-1}$	α_a	$4.9616e5 \text{ N.cm}^{-1}.V^{-1}$	α_b
10 V	N	10 V	V_{max}

زمانی شتابهای مطلق مناسب نبوده و حتی J_4 و J_5 در El-Centro به مقدار ۳،۱۵ و ۲،۶۸ رسیده اند. همچنین کنترل گر ANFIS۱ کاهش خوبی در برش پایه داشته و اختلاف کمی با کنترل غیرفعال دارد. کنترل گر ANFIS۲ در کاهش معیارهای J_1 و J_4 ، در عین اینکه نسبت به باقی حالات ضعیفتر می باشد، به طور مناسبی عمل نموده است. این کنترل گر ماکزیمم و میانگین زمانی شتابهای مطلق و برش پایه را بهتر از باقی حالات کاهش داده است. کنترل گر ANFIS۳ نیز همان طور که جدول ۳ و جدول ۴ نشان می دهند از همه معیارهای مربوط به کاهش جابجایی های جانبی نسبی، شتابهای مطلق و برش پایه بهره داشته و تقریباً پاسخهایی بین پاسخهای ANFIS۱ و ANFIS۲ را داراست.

جدول ۳. مقادیر معیارهای J_1 تا J_5 برای سازه کنترل شده با ANFIS۱، ANFIS۲ و ANFIS۳ و کنترل شده به صورت غیرفعال (P-On) تحت پنج زلزله

Tabas	Chi-Chi	Northridge	El-Centro	Kobe	
۰،۱۹۸	۰،۲۶۸	۰،۳۴۸	۰،۳۱۲	۰،۳۰۵	ANFIS۱
۰،۴۱۱	۰،۷۴۰	۰،۶۵۲	۰،۴۳۲	۰،۵۳۸	ANFIS۲
۰،۳۲۹	۰،۴۸۷	۰،۴۷۱	۰،۳۵۳	۰،۴۳۴	ANFIS۳
۰،۲۲۷	۰،۲۹۵	۰،۳۹۱	۰،۳۵۵	۰،۲۹۹	P-On
۱،۱۸۴	۳،۱۰۶	۱،۳۵۵	۳،۱۴۷	۰،۶۵۹	ANFIS۱
۰،۷۳۲	۱،۳۷۹	۰،۷۱۵	۰،۸۸۴	۰،۵۱۹	ANFIS۲
۰،۹۰۴	۱،۸۵۴	۰،۹۵۳	۱،۷۴۴	۰،۵۸۱	ANFIS۳
۱،۱۶۷	۳،۰۵۲	۱،۳۴۰	۳،۰۲۸	۰،۶۷۲	P-On
۰،۳۷۱	۰،۷۰۴	۰،۶۶۷	۰،۶۵۳	۰،۴۱۹	ANFIS۱
۰،۳۳۲	۰،۶۴۹	۰،۶۳۳	۰،۶۰۸	۰،۴۵۳	ANFIS۲
۰،۳۴۷	۰،۶۸۸	۰،۶۲۹	۰،۶۳۵	۰،۴۴۷	ANFIS۳
۰،۳۵۲	۰،۷۱۳	۰،۶۴۹	۰،۶۳۴	۰،۴۲۸	P-On

مقادیر پرنرنگ، کمترین مقدار هر معیار را بین چهار حالت کنترل شده در هر زلزله مشخص می کند.

لذا اگر طراح بیشتر مایل به کنترل شتابهای مطلق باشد بایستی نسبت q_2/q_1 را بزرگتر از ۰،۴۲ اختیار کرده و اگر کاهش بیشتری را در جابجایی های جانبی

با توجه به اینکه با زیاد شدن تعداد ورودیهای ANFIS مدت زمان آموزش بسیار بالا می رود، سعی بر آن شده است که با تعداد ورودیهای کم کنترل گری با کارایی بالا حاصل گردد. با توجه به اینکه (۱) سرعت نسبی طبقات (یعنی همان سرعت نسبی دوانتهای میراگر) تأثیر زیادی روی نیروی ایجاد شده دارند، (۲) سرعتهای طبقات به طور مستقیم توسط حسگرها قابل اندازه گیری هستند و (۳) ولتاژهای گامهای پیشین تأثیر بسزایی در ولتاژ بهینه دارند و با توجه به نتایج عددی حاصل از سعی و خطا برای طراحی کنترل گر هر طبقه دارای میراگر، از سرعت گام جاری، ولتاژ یک گام پیش و ولتاژ دو گام پیش در همان طبقه به عنوان ورودیها استفاده شده است. برای روشن شدن تأثیرات جملات موجود در تابع هدف پیشنهادی سه حالت زیر را در نظر می گیریم: (۱) کنترل گر ANFIS۱ که با اطلاعات مربوط به حالت $(1, 0) = (q_1, q_2)$ کنترل گر ANFIS۲ که با اطلاعات مربوط به حالت $(0, 1) = (q_1, q_2)$ و (۳) کنترل گر ANFIS۳ که با اطلاعات مربوط به حالت $(1, 0.42) = (q_1, q_2)$ آموزش دیده اند.

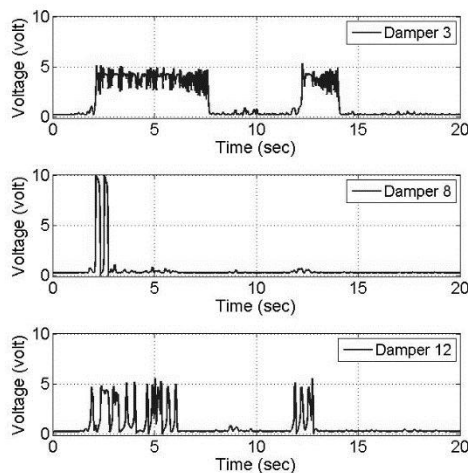
برای ارزیابی بهتر کنترل گرهای طراحی شده، ساختمان ۱۵ طبقه تحت سه زلزله دیگر (Kobe، Chi-Tabas) که جزو زلزله های آموزش داده نبوده اند نیز کنترل گشته و نتایج حاصل از هر پنج زلزله در جدول ۳ و جدول ۴ آمده است.

همان طور که دیده می شود نتیجه کنترل سازه با ANFIS۱ برای ماکزیمم و میانگین زمانی جابجایی های جانبی نسبی بهتر از بقیه حالات است و در Kobe نیز تقریباً با کنترل غیر فعال مساوی است. البته این کنترل گر برای کاهش ماکزیمم و میانگین

شدیدی است که روی اعضای سازه گذاشته و کارایی آنها را کاهش می‌دهد.

ولتاژ کنترلی خروجی از کنترل گر طبقات سوم، هشتم و دوازدهم تحت زلزله El-Centro در شکل ۳ آمده است. همان طور که در شکل دیده می‌شود کنترل گر طبقه سوم به دلیل نزدیکتر بودن به پایه سازه نوسانات متراکم تری در ولتاژ برای مقابله با نیروی ایجاد شده در اعضا تولید کرده است. کنترل گر طبقه هشتم تقریباً در وسط ارتفاع ساختمان قرار دارد و با اعمال حداکثر ولتاژ در لحظات وقوع پیک شتاب زلزله، از انتقال انرژی به طبقات بالاتر و ایجاد اختلاف فاز زیاد بین قسمت پایینی و بالایی سازه جلوگیری نموده است. کنترل گر طبقه دوازدهم نیز به دلیل دور بودن از پایه سازه و عدم وجود میراگر در سه طبقه بالاتر از آن، نوسانات شدیدتری را در ولتاژ ورودی به میراگر نسبت به طبقه سوم اعمال کرده است.

در حالت کنترل شده به صورت غیر فعال ولتاژ حداکثر در مدت وقوع زلزله به تمام میراگرها اعمال می‌شود در نتیجه نیروی مقاوم زیادی به طبقات وارد می‌گردد که باعث کاهش تغییر مکانهای جانبی نسبی می‌شود. به طور کلی در این حالت سختی معادل سازه افزایش یافته و دوره تناوب اصلی سازه کاهش می‌یابد. کاهش دوره تناوب باعث (۱) افزایش نوسانات در جابجایی های جانبی نسبی و (۲) افزایش مقادیر شتابهای مطلق شده است. این مطلب در شکل های ۴ و ۵ به خوبی مشاهده می گردد.



شکل ۳. ولتاژ کنترلی خروجی برای میراگرهای طبقات سوم، هشتم و دوازدهم تحت ۲۰ ثانیه از زلزله El-Centro

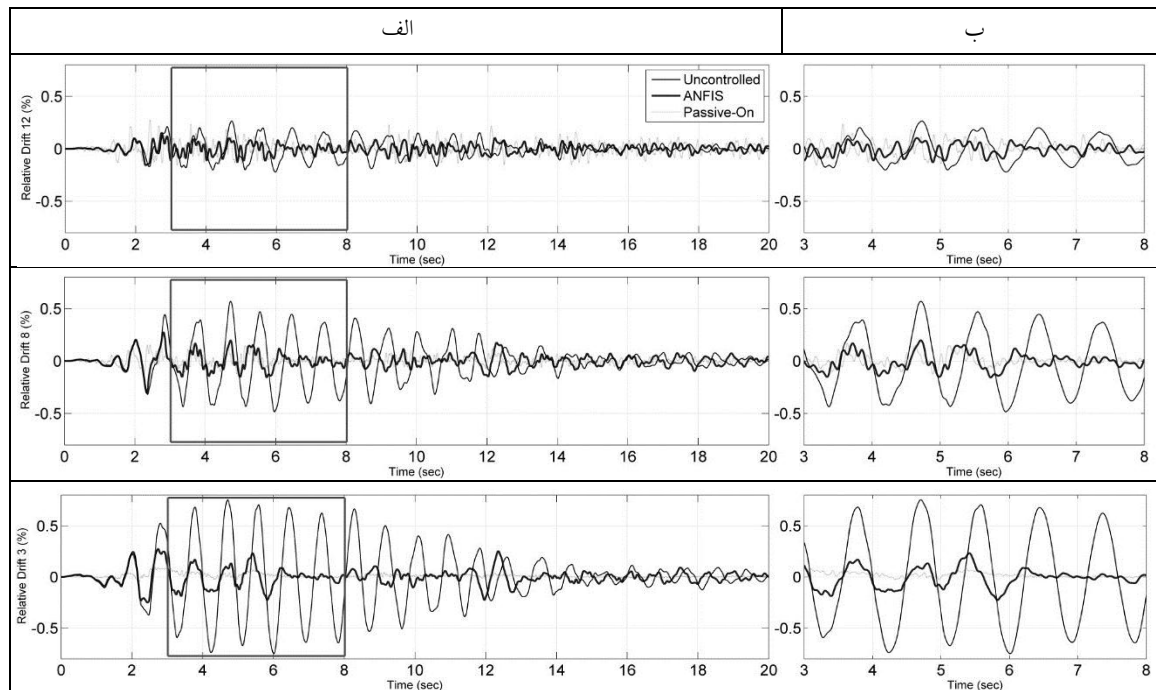
نسبی بخواهد بایستی که این نسبت را کوچکتر از ۰,۴۲ در نظر بگیرد. البته این کنترل گرها عموماً در کنترل برش پایه موفق عمل خواهند کرد.

جدول ۴. مقادیر معیارهای I_p تا I_4 برای سازه کنترل شده با ANFIS_۱، ANFIS_۲ و ANFIS_۳ و کنترل شده به صورت غیرفعال (P-On) تحت پنج زلزله

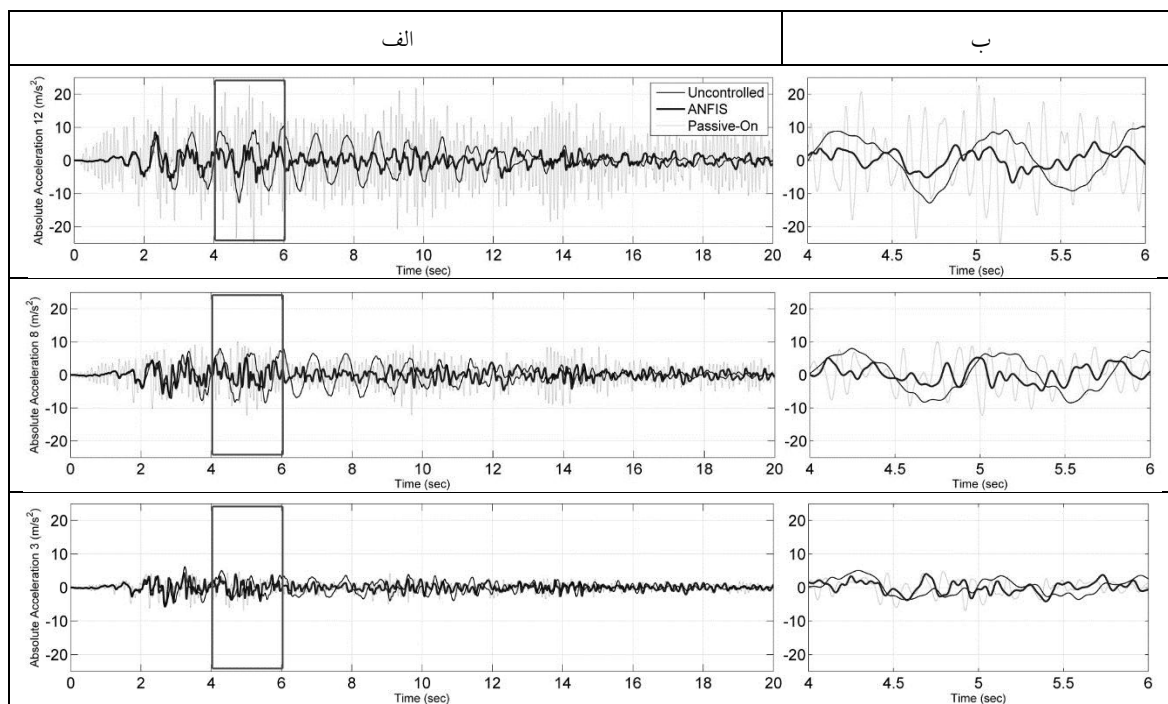
Tabas	Chi-Chi	Northridge	El-Centro	Kobe		
۰,۱۵۰	۰,۱۹۹	۰,۲۶۴	۰,۳۰۰	۰,۱۶۷	ANFIS _۱	J_4
۰,۳۰۳	۰,۴۴۲	۰,۴۹۹	۰,۳۰۹	۰,۳۹۸	ANFIS _۲	
۰,۲۱۷	۰,۳۲۲	۰,۳۷۴	۰,۳۰۰	۰,۲۹۷	ANFIS _۳	
۰,۱۸۷	۰,۲۱۴	۰,۳۰۲	۰,۳۳۰	۰,۱۷۲	P-On	
۱,۸۷۹	۱,۸۱۶	۱,۷۳۶	۲,۶۸۱	۰,۷۷۴	ANFIS _۱	J_5
۰,۶۵۷	۰,۶۸۹	۰,۷۴۴	۰,۸۰۹	۰,۵۴۳	ANFIS _۲	
۰,۹۷۶	۱,۰۵۲	۰,۹۶۵	۱,۵۴۲	۰,۶۳۷	ANFIS _۳	
۱,۶۹۵	۱,۸۱۸	۱,۷۴۱	۲,۸۴۶	۰,۸۳۸	P-On	
۰,۳۱۲	۰,۵۰۷	۰,۵۷۴	۰,۴۷۸	۰,۳۶۵	ANFIS _۱	J_6
۰,۳۰۷	۰,۵۱۱	۰,۵۴۵	۰,۴۱۷	۰,۳۶۰	ANFIS _۲	
۰,۳۱۰	۰,۵۰۸	۰,۵۵۶	۰,۴۳۹	۰,۳۶۶	ANFIS _۳	
۰,۳۰۹	۰,۵۲۷	۰,۵۸۸	۰,۴۶۸	۰,۳۶۴	P-On	

مقادیر پرننگ، کمترین مقدار هر معیار را بین چهار حالت کنترل شده در هر زلزله مشخص می‌کند

در اینجا کنترل گر ANFIS_۲ در نظر گرفته شده و مورد بررسی بیشتر قرار خواهد گرفت. این کنترل گر به طور متوسط کاهش ۴۵٪ در تغییر مکانهای جانبی نسبی داشته و عموماً در کنترل برش پایه نیز موفق تر عمل کرده و کاهش قابل توجهی را در حداکثر و میانگین زمانی شتابهای مطلق طبقات داشته است. همچنین توانسته است که کاهش ۶۹,۷٪ تا ۵۰,۱٪ را در متوسط زمانی جابجایی های جانبی نسبی، ۱۹,۱٪ تا ۴۵,۷٪ را در متوسط زمانی شتابهای مطلق و ۴۵,۵٪ تا ۶۹,۳٪ را در متوسط برش پایه داشته باشد. اهمیت کنترل شتابهای مطلق طبقات در حفظ امنیت ساکنین، اجزای داخلی، تجهیزات و اعضای غیر سازه‌ای و همچنین در کاهش اثرات موضعی



شکل ۴. تاریخچه زمانی تغییر مکانهای جانبی نسبی طبقات سوم، هشتم و دوازدهم (الف) برای ۲۰ ثانیه و (ب) برای ۳ تا ۸ از زلزله El-Centro در سه حالت کنترل با ANFIS، کنترل غیر فعال و کنترل نشده



شکل ۵. تاریخچه زمانی شتابهای مطلق طبقات سوم، هشتم و دوازدهم (الف) برای ۲۰ ثانیه و (ب) برای ۳ تا ۶ از زلزله El-Centro در سه حالت کنترل با ANFIS، کنترل غیر فعال و کنترل نشده

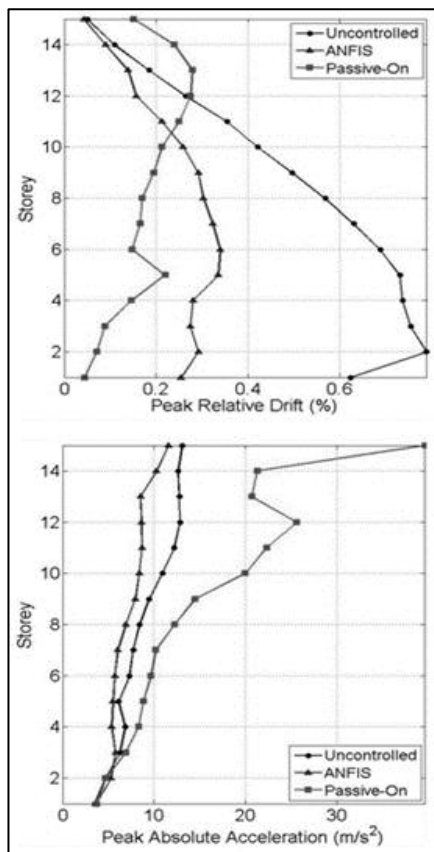
است. ظرفیت میراگرهای مورد استفاده در وضعیت ورود ولتاژ حداکثر ۵ ولت، برابر ۱٫۸ درصد وزن کل سازه بوده و مقادیر پارامترهای آن به شرح زیر می باشند:

$$\gamma = 300 \text{ cm}^{-2}, \beta = 300 \text{ cm}^{-2}, A = 120, N = 2$$

$$c_{0a} = 0.0064 \frac{N \cdot s}{\text{cm}}, c_{0b} = 0.0052 \frac{N \cdot s}{\text{cm} \cdot V}$$

$$\alpha_a = 8.66 \frac{N}{\text{cm}}, \alpha_b = 8.86 \frac{N}{\text{cm} \cdot V}$$

این ساختمان تحت زلزله El-Centro که به ۱۰ درصد واقعی خود مقیاس شده قرار گرفته است. نتایج حاصل از کنترل به روشهای معمول و روش پیشنهادی در این مقاله در جدول ۵ آمده است. جزئیات روشهای نام برده به طور کامل در مرجع [۳۱] آمده است.



شکل ۶. مقادیر حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی و شتاب مطلق برای سازه کنترل نشده، کنترل شده با ANFIS و کنترل شده به صورت غیرفعال تحت زلزله El-Centro

در حالت کنترل شده با ANFIS به گونه‌ای به میراگرها دستور داده شده است که در عین اعمال نیروی مقاوم کافی برای کاهش تغییر مکانهای جانبی نسبی، مقدار زیادی از انرژی توسط آنها جذب شده و شتابهای مطلق تا حد مناسبی کاهش پیدا کنند. لذا همانطور که در شکل‌های ۴ و ۵ قابل ملاحظه است، این کنترل‌گر در عین کاهش جابجایی های جانبی نسبی، نوسانات آن را نیز کاهش داده که این منجر به پایین نگه داشتن مقدار شتابهای مطلق طبقات شده است.

مقادیر حداکثر زمانی تغییر مکان جانبی نسبی و شتاب مطلق حاصل از کنترل‌گرهای ANFIS، کنترل غیر فعال و سازه کنترل نشده تحت زلزله El-Centro در شکل ۶ آمده است. شکل ۶ در تایید توضیحات بالا نشان می‌دهد که ANFIS کاهش خوبی را بر جابجایی جانبی نسبی داشته و در طبقات یازدهم تا پانزدهم از کنترل غیرفعال بهتر عمل نموده است. همچنین کنترل خوبی را روی شتاب مطلق، مخصوصاً در طبقات دوازدهم تا پانزدهم داشته است. این در حالی است که کنترل غیر فعال در طبقات ۱۲ به بالا کنترل خوبی روی جابجایی جانبی نسبی و بویژه روی شتاب مطلق طبقات نداشته است.

به دلیل اینکه مود اول تغییر شکل در حالت کنترل نشده قسمت اعظمی از پاسخ سازه را تشکیل می‌دهد، همان‌طور که در شکل ۶ نیز دیده می‌شود تغییر مکانهای جانبی نسبی طبقات پایینی زیاد بوده و برای طبقات بالایی کاهش یافته است و این روند برای شتابهای مطلق معکوس می‌باشد.

مثال دوم

در این مثال از ساختمان مورد مطالعه توسط Jansen و Dyke [۳۱] استفاده شده تا رهیافت کنترلی ارائه شده در این مقاله با روشهای کنترلی معمول پیشین مقایسه گردد. در اینجا یک ساختمان ۶ طبقه با ۲ میراگر در طبقه اول و ۲ میراگر در طبقه دوم در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است. جرم، سختی و ارتفاع هر طبقه به ترتیب ۲۲٫۷ کیلوگرم، ۲۹٫۷۰۰ کیلونیوتن و ۳۰ سانتی متر بوده و ضریب میرایی برای تمام موده‌ها ۰٫۵ درصد فرض شده

ای پیشنهاد گشته است که معیارهای مربوط به کاهش تغییر مکان جانبی نسبی، شتاب مطلق و انرژی جذب شده توسط اعضای سازه ای طبقات و همچنین کاهش و لتاژ اعمالی به میراگرها را در خود جای داده است. سپس معادلات مربوط به رفتار میراگر به صورت درگیر با معادلات حرکت سازه در نظر گرفته شده و از روش کنترل بهینه برای محاسبه ولتاژهای بهینه به صورت عددی استفاده گردیده است. در نهایت با استفاده از پاسخهای عددی حاصل از کنترل بهینه، چند شبکه عصبی-فازی ANFIS موزی به عنوان یک کنترل گر مجتمع که روند کنترلی بهینه و مدل معکوس میراگر را توأم در خود جای داده است آموزش داده شده اند تا بتوانند در حین زلزله به سرعت و به دقت ولتاژهای لازم برای میراگرها را تعیین نمایند.

به منظور ارزیابی رهیافت کنترل پیشنهادی دو مثال به طور عددی کنترل گشته اند. در مثال اول پارامترهای مؤثر در تابع هدف پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج کنترل نشان دهنده این بوده است که با تنظیم ضرایب موجود در تابع هدف و تولید داده های بهینه و آموزش کنترل گر ANFIS می توان بسته به نظر طراح، پاسخهای سازه ای را به سمت کاهش جابجایی های جانبی نسبی، شتابهای مطلق یا ترکیبی از این دو هدایت کرد. در مثال دوم نیز سه حالت از کنترل گرهای پیشنهادی در این مقاله با روشهای معمول پیشین مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می دهند که کنترل-گرهای پیشنهادی قادرند معیارهای مربوط به جابجایی های جانبی نسبی یا شتابهای مطلق را بهتر از بقیه روشها کاهش دهند. البته لازم به ذکر است که این کنترل گرها به طور همزمان در کاهش هر دو معیار بهتر از همه روشهای قبلی نبوده اند لیکن می توانند کاهش همزمان مناسبی در هر دو معیار گفته شده را داشته باشند.

۸- منابع

[۱] Cheng; F.Y.; Jiang; H. and Lou; K.; "Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control"; New York: CRC Press; ۲۰۰۸؛ ۴۵-۱.

همانطور که در جدول ۵ مشاهده می گردد کنترل گر ANFIS۱ در کاهش جابجایی های جانبی نسبی موفق تر از بقیه بوده ولی شتابهای مطلق را در حد کنترل Passive-on افزایش می دهد. کنترل گر ANFIS۱، Passive-on، کنترل-گر شماره ۷ و ۱۱ فقط در کاهش ۱۱ مناسب عمل نموده اند و ۱۲ را افزایش داده اند. همچنین کنترل گرهای ۸، ۹ و ۱۲ با ثابت نگه داشتن حداکثر شتابهای مطلق طبقات، توانسته اند ۱۱ را کاهش دهند. کنترل گر ANFIS۲ در معیار ۱۱ به مقدار ۶ درصد و در معیار ۱۲ به مقدار ۲۴٫۴ درصد بهتر از شماره ۶ بوده است. ANFIS۲ در مقایسه با کنترل-گر شماره ۱۰، شتابهای مطلق طبقات را ۱۲٫۴ درصد بیشتر و جابجایی های جانبی نسبی را ۸ درصد کمتر کاهش داده است. در مقابل، کنترل گر ANFIS۳ در مقایسه با کنترل گر ANFIS۲ معیار ۱۱ را به مقدار ۹ درصد کاهش و ۱۲ را به مقدار ۳۵٫۷ درصد افزایش داده است.

جدول ۵. مقادیر معیارهای ۱۱ و ۱۲ برای ANFIS۲ و روشهای دیگر

ردیف	رهیافت کنترل	J _۱	J _۲
۱	Passive-Off	۰٫۸۰۱	۰٫۹۰۴
۲	Passive-On	۰٫۶۹۶	۱٫۴۱۰
۳	ANFIS۱	۰٫۵۳۹	۱٫۴۲۶
۴	ANFIS۲	۰٫۷۲۴	۰٫۵۱۲
۵	ANFIS۳	۰٫۶۳۲	۰٫۸۶۹
۶	Lyapunov Controller A	۰٫۷۸۸	۰٫۷۵۶
۷	Lyapunov Controller B	۰٫۵۴۸	۱٫۳۹۰
۸	Decentralized Bang-Bang	۰٫۷۹۱	۱٫۰۰۰
۹	Maximum Energy Dissipation	۰٫۶۲۰	۱٫۰۶۰
۱۰	Clipped-Optimal A	۰٫۶۴۰	۰٫۶۳۶
۱۱	Clipped-Optimal B	۰٫۵۴۷	۱٫۲۵۰
۱۲	Modulated Homogeneous Friction	۰٫۵۵۹	۱٫۰۶۰

۷- خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا تابع هدف جدیدی به گونه

- Journal of Engineering Mechanics; ۱۹۹۹.
- [۱۱] Dyke, S.J.; Spencer Jr.; B.F.; Quast, P.; Sain; M.K.; Kaspari Jr.; D.C. and Soong; T.T.; "Acceleration Feedback Control of MDOF Structures"; J. of Engrg. Mech.; ASCE; Vol. ۹) ۱۲۲); pp. ۱۹۹۶; ۹۱۸-۹۰۷.
- [۱۲] Dyke, S.J.; Spencer Jr.; B.F. Sain; M.K. and Carlson; J.D.; "Modeling and Control of Magneto-rheological Dampers for Seismic Response Reduction;" Smart Material in Structures; ۵) ۱۰); pp ۱۹۹۶; ۵۷۵-۵۶۵.
- [۱۳] Dyke; S.J. and Spencer Jr. B.F.; "A Comparison of Semi-Active Control Strategies for the MR Damper"; Proc. of the IASTED Intl. Conf. on Intelligent Info. Systems; Bahamas; pp.; ۵۸۴-۵۸۰ ۱۹۹۷.
- [۱۴] Chang; C.C. and Roschke; P.; "Neural network Modeling of a Magneto-rheological Damper"; Journal of Intelligent Materials; System and Structure; Issue ۹; pp. ۱۹۹۸; ۷۶۴-۷۵۵.
- [۱۵] Schurter; K.C.; Roschke; P.; "Fuzzy Modeling of a Magneto-rheological Damper Using ANFIS"; the Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems; Issue ۱; pp. ۲۰۰۰; ۱۲۷-۱۲۲.
- [۱۶] Xia; P.Q.; "An Inverse Model of MR Damper Using Optimal Neural Network and System Identification"; Journal of Sound and Vibration; ۲۶۶ ۵); pp. ۲۰۰۳; ۱۰۲۳-۱۰۰۹.
- [۱۷] Kim; Y.; "Nonlinear Identification and Control of Building Structures Equipped with Magneto-rheological Dampers"; A dissertation of the Office of Graduate Studies of Texas; A&M University; ۲۱۷ pages; ۲۰۰۷.
- [۱۸] Mehrkian; B.; Bahar; A.; Chaibakhsh; A.; "Genetic Algorithm Based Optimization Approach for MR Dampers Fuzzy Modeling"; WASET Proceeding of International Conference on Earthquake and Structural Engineering; Vol. ۵۹; pp. ۲۰۱۱; ۱۰۴۱-۱۰۳۵.
- [۱۹] Ghasemi; M.R. and Barghi; E.; "Estimation of Inverse Dynamic Behavior of MR Dampers Using
- [۲] Spencer Jr.; B.F.; Dyke; S.J.; Sain; M.K. and Carlson; J.D.; "Phenomenological Model of a Magneto-rheological Damper;" ASCE Journal of Engineering Mechanics; ۳) ۱۲۳); pp. ۱۹۹۶; ۲۳۸-۲۳۰.
- [۳] فایضی؛ ا.؛ محرمی؛ ح.؛ «کنترل نیمه فعال سازه‌ها بر مبنای روش تغییراتی به وسیله الگوریتم تندترین شیب با استفاده از میراگرهای MR»؛ پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران؛ دانشگاه فردوسی مشهد؛ مشهد؛ ایران؛ ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت؛ ۱۳۸۹.
- [۴] فایضی؛ ا.؛ «کنترل سازه‌ها در مقابل زلزله به وسیله میراگرهای MR با استفاده از شبکه‌های عصبی فازی»؛ پایان نامه کارشناسی ارشد؛ به راهنمایی دکتر حمید محرمی؛ دانشگاه دانشگاه تربیت مدرس؛ دانشکده عمران و محیط زیست؛ گروه سازه؛ اردیبهشت؛ ۱۳۸۹.
- [۵] Feng; Q.; and Shinozuka; M.; "Use of a Variable Damper for Hybrid Control of Bridge Response Under Earthquake"; Proc. U.S. Nat. Workshop on Struct. Control Res.; USC Publ. No. CE۹۰۱۳-; pp. ۱۹۹۰; ۱۱۲-۱۰۷.
- [۶] McClamroch; N.H. and Gavin; H.P.; "Closed Loop Structural Control Using Electrorheological Dampers"; Proc. of the Amer. Ctrl. Conf.; pp.-۴۱۷۳ ۱۹۹۵; ۷۷.
- [۷] Dyke; S.J. and Spencer Jr. B.F.; "Seismic Response Control Using Multiple MR Dampers"; Proc. of the ۲nd Intl. Workshop on Struc. Control; pp. ۱۹۹۶; ۱۷۳-۱۶۳.
- [۸] Dyke; S.J.; Yi; F.; Carlson; J.D.; "Investigation of Magneto-rheological Dampers for Earthquake Hazard Mitigation;" Proc. of ۲nd World Conf. on Structural Control; UK; pp. ۱۹۹۸; ۳۵۸-۳۴۹.
- [۹] Yi; F.; Dyke; S.J.; Caicedo; J.M.; and Carlson; J.D.; "Seismic Response Control Using Smart Dampers"; Proceedings of the ۱۹۹۹ American Control Conference; pp. ۱۹۹۹; ۲۶-۱۰۲۲.
- [۱۰] Yi; F.; Dyke; S.J.; Caicedo; J.M.; and Carlson; J.D.; "Experimental Verification of Multi-Input Seismic Control Strategies for Smart Dampers;"

- [۲۸] Bitaraf; M.; Barroso; L.R.; "Structural Performance Improvement Using MR Dampers with Adaptive Control Method"; American Control Conference; USA; ۲۰۰۹.
- [۲۹] Nguyen; M.T.; Dalvand; H.; Yu; Y-H. and Ha ; Q.P.; "Seismic Responses of Civil Structures Under Magneto-rheological Device Direct Control"; the ۲۰th International Symposium on Automation and Robotics in Construction; ۲۰۰۸.
- [۳۰] Wen; Y.K.; "Method for Random Vibration of Hysteretic Systems"; Journal of the Engineering Mechanics Division; Vol. ۱۰۲; No. ۲; pp. ;۲۶۳-۲۴۹ ۱۹۷۶.
- [۳۱] Jansen; L.M. and Dyke; S.J.; "Semi-Active Control Strategies for MR Dampers: A Comparative Study"; ASCE Journal of Engineering Mechanics; Vol. ۱۲۶; No. ۸; pp.۲۰۰۰ ;۸۰۳-۷۹۵.
- [۳۲] Ohtori; Y.; Christenson; R.E.; Spencer Jr; B.F. and Dyke; S.J.; "Benchmark Control Problems for Seismically Excited Nonlinear Buildings;" ASCE Journal of Engineering Mechanics; ۴) ۱۳۰); pp.۳۶۶ ۲۰۰۴ ;۳۸۵.
- [۳۳] Clough; R.W.; Penzin; J.; "Dynamics of Structures"; USA: Computers & Structures Inc.; ۲۰۰۳ ;۲۵۶-۲۱۹.
- [۳۴] Jang; J-Sh. R.; Sun; Ch-T.; Mizutani; E.; "Neuro-fuzzy and soft computing: A computational approach to learning and machine intelligence;" USA: Prentice-Hall Inc.; ۱۹۹۷.
- Artificial and Fuzzy-based Neural Networks"; Int. J. Optim. Civil Eng.; Issue ۳)۲); pp.۲۰۱۲ ;۳۶۸-۳۵۷.
- [۲۰] Xua; Z-D. and Guo; Y-Q.; "Neuro-Fuzzy Control Strategy for Earthquake-Excited Nonlinear Magnetorheological Structures"; Soil Dynamics and Earthquake Engineering; Vol. ۲۸; pp.۲۰۰۸ ;۷۲۷-۷۱۷.
- [۲۱] Schurter; K.C. and Roschke; P.N.; "Neuro-Fuzzy Control of Structures Using Acceleration Feedback"; Smart Mater. Struct.; Vol. ۱۰; pp.۲۰۰۱ ;۷۷۹-۷۷۰.
- [۲۲] Faravelli; L.; Yao; T.; "Use of Adaptive Networks in Fuzzy Control of Civil Structures"; Microcomputers in Civil Engineering; Issue ۱۱; pp.۱۹۹۶ ;۷۶-۶۷.
- [۲۳] K-Karamodin; A.; H-Kazemi; H.; "Semi-Active Control of Structures Using Neuro-Predictive Algorithm for MR Dampers;" Structural Control and Health Monitoring; ۲۰۰۸.
- [۲۴] Askari; M.; Li; J. and Samali; B.; "Semi-Active LQG Control of Seismically Excited Nonlinear Buildings using Optimal Takagi-Sugeno Inverse Model of MR Dampers"; Vol.۱۴; pp.;۲۷۷۲-۲۷۶۵ ۲۰۱۱.
- [۲۵] Xu; Z-D. and Guo; Y-Q.; "Integrated Intelligent Control Analysis on Semi-Active Structures by Using Magnetorheological Dampers"; Science in China Press; ۲۰۰۸.
- [۲۶] Yan; G.; Zhou; L.L.; "Integrated Fuzzy Logic and Genetic Algorithms for Multi-Objective Control of Structures Using MR Dampers"; Journal of Sound and Vibration; Issue ۲۹۶; pp.۲۰۰۶ ;۳۸۲-۳۶۸.
- [۲۷] Xu; Z-D.; Shen; Y-P. and Y Guo; Y-Q.; "Semi-Active Control of Structures Incorporated with Magnetorheological Dampers Using Neural Networks"; Smart Mater. Struct.; Vol. ۲۰۰۳ ;۱۲.

