



کنترل نیمه فعال فازی سازه پنج طبقه در برابر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک با کمک میراگر اصطکاکی و فعال کننده‌های پیزوالکتریک

اکبر بطهائی^۱، میثم رمضانی^۲، سید مهدی زهرائی^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی زلزله، دانشگاه تهران، تهران

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵، mzahrai@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۳۰)

چکیده

کنترل ارتعاشات سازه امروزه به یک زمینه چالش برانگیز در بین محققین و مهندسين تبدیل گشته است. خسارات وارده به سازه‌ها در برابر زلزله‌های اخیر که باعث تلفات جانی و مالی در کشورهای مختلف گشته است، اهمیت کنترل ارتعاشات سازه در برابر زلزله را بیش از پیش آشکار می‌سازد. در سال‌های اخیر کنترل نیمه فعال به عنوان یک روش کنترل کارآمد و قابل اطمینان مطرح گشته است، که از خاصیت اعتمادپذیری کنترل غیرفعال و خاصیت انعطاف‌پذیری کنترل فعال بهره می‌گیرد. در این مطالعه عملکرد کنترل نیمه فعال با کمک فعال کننده‌های پیزوالکتریک نصب شده بر روی میراگر اصطکاکی که مطابق الگوریتم کنترل منطق فازی تصمیم می‌گیرد، بر روی مدل سازه پنج طبقه بررسی شده است. به همین منظور نتایج تحلیل برای دو حالت کنترل نیمه فعال و غیرفعال مقایسه شده است. نتایج حالت نیمه فعال برای معیارهای ارزیابی تغییر مکان و برش پایه برای زلزله‌های حوزه دور به طور متوسط به ترتیب ۱۲ و ۱۳/۸ درصد بهبودی نسبت به حالت غیرفعال را نشان می‌دهد در حالی که این بهبود برای زلزله‌های حوزه نزدیک به ترتیب برابر ۳/۴ و ۴/۷ درصد می‌باشد. علاوه بر این، حساسیت سیستم کنترلی نیمه فعال به طور میانگین برای زلزله‌های حوزه نزدیک و دور به ترتیب برابر ۴۳ و ۳۳/۱ درصد نسبت به حالت غیرفعال کاهش داشته است.

واژگان کلیدی

میراگر اصطکاکی، فعال کننده‌های پیزوالکتریک، الگوریتم کنترل منطق فازی، تحلیل دینامیکی افزایشی

Semi-active Fuzzy Control of 5-Story Structure under Near & Far Field Earthquakes Using Piezoelectric Friction dampers

A. Bathaei, M. Ramezani, S.M. Zahrai

Abstract

One of the main challenges civil engineers face today is to find more effective means for protecting structures and their contents from the damaging effects of dynamic hazards such as strong earthquakes. Vibration control of civil engineering structures have been studied for three decades. Casualties and economic damages in recent earthquakes at different countries show the importance of vibration control of structures. Vibration control of structures evolves from passive control, active control to semi-active control. Recently, semi-active control systems have attracted much attention because they have good efficiency with best features of both passive and active control. In this paper the performance of the semi-active control systems used by piezoelectric friction dampers was studied. The damper system was set on 5-story structure model and in order to adjust and assign the voltage on piezoelectric elements; the fuzzy logic controller was used. Two input variables including relative displacement and velocity of stories were assigned to the fuzzy logic controller; moreover, the command voltage was assigned as output variable. Incremental dynamic analysis of structure with maximum acceleration from 0.1g to 1g was used. The results of both semi-active and passive control were compared. The average results of semi-active control for displacement and base shear evaluation criteria show 12 and 3.4% of improvement compared to those of passive control, respectively; under far-field earthquakes while 13.8% and 4.7% improvements were observed under near-field earthquakes. Moreover, the sensitivity of the semi-active control systems shows 43% and 33.1% reduction compared to that of passive control under far-field and near-field earthquakes respectively.

Keywords

Piezoelectric friction damper, Fuzzy logic control algorithm, Incremental dynamic analysis

نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد / ۶۵



می‌باشد. فعال‌کننده‌های الکترومغناطیسی یکی از راهکارهای بسیار خوب است که با استفاده از موتورهای الکتریکی اقدام به تنظیم نیرو می‌کنند؛ ولی محدودیت اصلی این فعال‌کننده‌ها رفتار خطی آن‌ها می‌باشد [۲].

اخیراً فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک^۲ به منظور تنظیم نیروی اصطکاکی مورد توجه محققین قرار گرفته است. میراگرهای اصطکاکی مجهز به فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک یکی از انواع میراگرهای نیمه‌فعال می‌باشند که از مواد پیزوالکتریک نظیر سرامیک و کریستال استفاده می‌کنند. این میراگرها با استفاده از جریان الکتریسته فعال گشته و یک سطح بالایی از تنش و یا کرنش را تولید می‌کنند [۳]. نیروی عمودی سطح در یک میراگر اصطکاکی مجهز به فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک با استفاده از تنظیم صفحات فعال‌کننده صورت می‌پذیرد؛ که در این حالت با اعمال ولتاژ، صفحات فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک سریعاً نیروی مورد نیاز را به منظور کنترل ایجاد می‌کنند؛ علاوه بر این فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک در گستره‌ی وسیعی از فرکانس‌های بارگذاری فعال می‌گردند و با داشتن خاصیت اعتمادپذیری و تطبیق‌پذیری در مهندسی عمران به طور معمول به کار می‌روند [۴]. در طی سال‌های اخیر مطالعات مختلفی در مورد کنترل سازه‌ها با استفاده از میراگرهای اصطکاکی مجهز به فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک صورت گرفته است. Kamada و همکارانش [۵] در سال ۱۹۹۷ از فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک برای کنترل ارتعاشات ستون‌های تحت لنگر خمشی در یک سازه مقیاس‌شده چهار طبقه، با ارتفاع طبقه ۳/۷ متر و با مقاطع فولادی و پلان مستطیلی استفاده نمودند. آن‌ها سازه موردنظر را در دو حالت تحت بررسی قرار دادند که در حالت اول از هشت فعال‌کننده به صورت عمودی در زیر هر ستون در طبقه همکف استفاده نمودند. در روش دوم از هشت فعال‌کننده در ستون‌های طبقه همکف و اول استفاده نمودند و در هر دو حالت سازه را تحت تحریک بار سینوسی قرار دادند و دریافتند که در هر دو حالت این میراگرها ارتعاشات سازه را به خوبی کنترل نموده است. Udawadia و همکارانش [۶] در سال ۱۹۹۸ از ابزار نیمه‌فعال که شامل فعال‌کننده پیزوالکتریک بودند برای کنترل یک مدل چند درجه آزادی استفاده نمودند. Chen و Chen [۷] در سال ۲۰۰۰ عملکرد میراگرهای اصطکاکی مجهز به فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک در یک سازه یک‌درجه آزادی تحت بار هارمونیک را مورد مطالعه قرار دادند و به همین منظور یک الگوریتم کنترلی را ارائه نمودند. Durmaz و همکارانش [۸]

کنترل ارتعاشات سازه‌ها در برابر بارهای باد و زلزله در سه دهه گذشته پیشرفت‌های قابل توجهی کرده است. به طور کلی کنترل ارتعاشات سازه‌ها را می‌توان در سه دسته تقسیم‌بندی نمود. دسته اول، کنترل به روش غیرفعال می‌باشد که این سیستم کنترلی با افزودن ابزارها و یا میراگرهایی که نیازی به انرژی خارجی ندارند، اجرا می‌شوند. روش دوم، کنترل فعال ارتعاشات سازه‌ها می‌باشد که در این سیستم کنترلی معمولاً نیاز به سنسورها، سیستم پردازش‌گر و عملگرها می‌باشد؛ که سیستم پردازش‌گر باید به صورت آنی داده‌های دریافتی از سنسورها را تحلیل کرده و عملگرهای کنترلی را فعال نماید؛ که در این سیستم کنترلی نیاز به انرژی خارجی زیاد به منظور تولید نیروی کنترلی می‌باشد. روش سوم، کنترل نیمه‌فعال است؛ که این سیستم کنترلی با دریافت یک انرژی خارجی اندک و با تغییر دادن پارامترهای معین سازه، ارتعاشات سازه را کاهش می‌دهد [۱].

میراگرهای اصطکاکی به طور گسترده‌ای به دلیل اثربخشی و سادگی آن به عنوان یک روش کنترل غیرفعال در سیستم ارتعاشی به کار رفته است. این روش کنترل به این صورت می‌باشد که در صورت حرکت نسبی دو صفحه نسبت به هم، نیروی اصطکاکی برای کنترل ارتعاش سازه ایجاد می‌گردد. گسترش میراگرهای اصطکاکی به همراه ابزارهای نیمه‌فعال به سه دلیل زیر با مشکلاتی روبه‌رو بوده است. دلیل اول عدم پیوستگی نیروی اصطکاکی در سرعت صفر می‌باشد؛ چرا که در سرعت صفر نیروی اصطکاکی میراگر اصطکاکی مجهز به فعال‌کننده پیزوالکتریک به صورت لحظه‌ای صفر می‌شود و پیوستگی نیروی کنترلی از بین می‌رود. دلیل دوم این است که ضریب استاتیکی به طور قابل توجهی از ضریب اصطکاک جنبشی بیشتر است؛ که در این حالت پدیده چسبندگی-لغزش^۱ رخ خواهد داد. این پدیده به این علت رخ می‌دهد که در حقیقت نیروی اصطکاکی تابع برخی از عوامل همچون دما، جابجایی، زمان و یا سرعت ثابت، می‌باشد. دلیل سوم و مهمترین دلیل که میراگرهای اصطکاکی هوشمند به طور کامل گسترش نیافته است، فعال‌کننده‌ها هستند. در تحقیقات گذشته برای کنترل و تأمین نیروی اصطکاکی مناسب، نیروی عمودی دو سطح درگیر از طریق ابزارهای هیدرولیکی تأمین می‌گردید. عیب اصلی این فعال‌کننده‌ها تأخیر زمانی موجود در سیستم کنترلی در تنظیم نیروی اصطکاکی می‌باشد؛ چراکه در یک میراگر اصطکاکی هوشمند، زمان تنظیم نیرو دارای بیشترین اهمیت

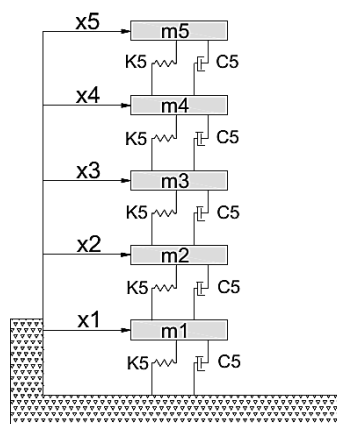
۲- مدل سازی سازه و سیستم های کنترلی غیرفعال و

نیمه فعال

در این مطالعه، میراگر مورد نظر بر روی یک سازه پنج طبقه، که در مطالعه Johnson [۱۳] به منظور بررسی عملکرد کنترل کننده های فازی مورد بررسی قرار گرفته است، استفاده شده است. این سازه پنج طبقه به صورت جرم متمرکز^۱ مدل گشته است؛ همچنین رفتار سازه مورد نظر در طی تحلیل های لرزه ای به صورت الاستیک فرض شده است. زمان تناوب سازه مورد نظر برابر ۰/۳ ثانیه و میرایی مد اول سازه ۲٪ می باشد. مشخصات سازه مورد نظر در جدول (۱) و مدل جرم متمرکز سازه در شکل (۱) سازه نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات سازه مورد مطالعه [۱۴]

طبقه	جرم کف طبقات (kg)	سختی طبقات (kN/m)	میرایی طبقات (kN.s/m)
اول	۵۸۹۷	۳۳۷۳۲	۶۷
دوم	۵۸۹۷	۲۹۰۹۳	۵۸
سوم	۵۸۹۷	۲۸۶۲۱	۵۷
چهارم	۵۸۹۷	۲۴۹۵۴	۵۰
پنجم	۵۸۹۷	۱۹۰۵۹	۳۸



شکل ۱- مدل جرم متمرکز سازه مورد مطالعه

مدل سازه پنج طبقه معرفی شده در نرم افزار OpenSees به صورت جرم متمرکز مدل سازی شده است؛ که برای سختی طبقات از اعضای الاستیک با سختی طبقه و برای میرایی طبقات از میراگرهای ویسکوز با میرایی مد اول ۲٪ استفاده شده است. زمان تناوب مدل ساخته شده در نرم افزار OpenSees برابر ۰/۳

در سال ۲۰۰۲ یک مدل پروتوتایپ^۲ از میراگرهای اصطکاکی مجهز به فعال کننده های پیزوالکتریک را مورد مطالعه قرار دادند و با اعمال انرژی ورودی کم، نیروی کنترلی زیادی را برای کنترل سازه مورد نظر ایجاد نمودند. Chen و Chen [۹] در سال ۲۰۰۴ از الگوریتم کنترل با مصرف انرژی بهینه ارائه نمودند و از این الگوریتم به منظور کنترل ارتعاشات یک سازه معیار ۲۰ طبقه استفاده کردند و در مدل خود از فعال کننده های پیزوالکتریک استفاده نمودند. آن ها مدل سازه ای خود را تحت تحریک زلزله های السترو، کوبه، هاجینوهه و نورث ریج قرار دادند و دریافتند که با استفاده از الگوریتم پیشنهاد شده به منظور کنترل مناسب سازه انرژی مورد نیاز برابر ۲۰ کیلووات می باشد. Preumont و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۰۸ به بررسی کنترل ارتعاشات یک سازه مقیاس شده با استفاده از میراگرهای اصطکاکی مجهز به فعال کننده های پیزوالکتریک پرداختند و مدل مربوطه را تحت تحریک زلزله السترو قرار دادند و نشان دادند که کنترل ارتعاشات سازه با استفاده از میراگرهای اصطکاکی مجهز به فعال کننده های پیزوالکتریک حالت نیمه فعال بهتر از حالت غیرفعال می باشد. Muanke و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۰۸ از دو میراگر اصطکاکی که شامل دو فعال کننده پیزوالکتریک بودند برای ایجاد نیروی عمودی در پدهای اصطکاکی استفاده نمودند. Ng و Xu [۱۲] در سال ۲۰۰۸ از میراگرهای اصطکاکی مجهز به فعال کننده های پیزوالکتریک در یک مدل آزمایشگاهی استفاده نمودند و مدل سازه را تحت اثر تحریک زلزله های السترو، هاجینوهه، کوبه و نورث ریج قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در حالت استفاده از میراگرهای اصطکاکی مجهز به فعال کننده پیزوالکتریک شتاب و تغییر مکان نسبی سازه ۱۷ الی ۲۰ درصد نسبت به حالت کنترل غیرفعال بیشتر کاهش یافته است.

در این مطالعه به منظور بهبود رفتار میراگرهای اصطکاکی از فعال کننده های پیزوالکتریک از سیستم استنتاجی فازی استفاده شده است. با توجه به تطبیق پذیری سیستم های استنتاجی فازی در تصمیم گیری برای سیستم های پیچیده، کاربرد این روش در کنترل ارتعاشات سازه مناسب می باشد. استفاده از فعال کننده های پیزوالکتریک به همراه سیستم استنتاج فازی می تواند برای شدت های مختلف زلزله، میراگر اصطکاکی را فعال کرده و با تنظیم مناسب نیروی اصطکاکی به خوبی رفتار لرزه ای سازه را کنترل نمایند.

ثانیه می‌باشد.

معادله دینامیکی حاکم بر سیستم سازه با میراگر مجهز به فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک به صورت زیر می‌باشد.

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = D\dot{u}(t) + Ef(t) \quad (1)$$

که در این رابطه؛ M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه می‌باشد. پارامترهای $\ddot{X}$ ، $\dot{X}$ و X پاسخ شتاب، سرعت و تغییر مکان سازه نسبت به تراز پایه می‌باشد. $u(t)$ نیروی تولید شده توسط میراگر پیزوالکتریک که به کف سازه وارد می‌گردد و $f(t)$ نیروی تحریک خارجی که برابر $-\ddot{u}_g$ می‌باشد که شتاب تحرک زمین می‌باشد. بردارهای D و E به ترتیب معرف بردار محل اعمال نیروی کنترلی و نیروی اعمالی خارجی می‌باشد که در رابطه (۲) و (۳) نشان داده شده‌اند.

$$D = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]^T \quad (2)$$

$$E = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]^T \quad (3)$$

معادله (۱) در فضای حالت به صورت رابطه (۴) بیان می‌گردد.

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + Hf(t) \quad (4)$$

که در رابطه (۴)، z بردار حالت سیستم ارتعاشی می‌باشد و ماتریس‌های A ، B و H با استفاده از روابط (۵) تا (۷) محاسبه می‌گردند [۱۴].

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{bmatrix} \quad (6)$$

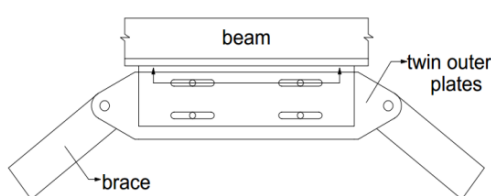
$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \end{bmatrix} \quad (7)$$

برای مدل‌سازی عددی سازه از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. OpenSees یک چارچوب نرم‌افزاری شی‌گرا برای شبیه‌سازی کاربردها در مهندسی زلزله با استفاده از روش‌های المان محدود است. این نرم‌افزار شامل مجموعه کاملی از المان‌ها، مصالح و روش‌های مختلف تحلیل بوده و توانایی مدل‌سازی و تحلیل را در زمینه‌های میکرو و ماکرو دارا می‌باشد، به طوری که می‌توان گفت نرم‌افزار OpenSees سریع‌ترین نرم‌افزار تحلیل غیرخطی موجود می‌باشد [۱۵].

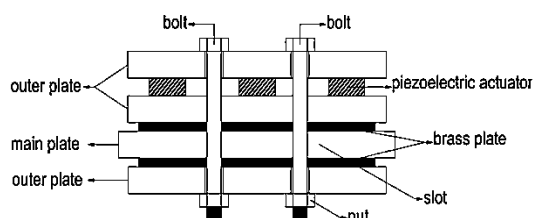
امروزه میراگرهای اصطکاکی به طور گسترده به منظور مستهلک‌نمودن انرژی و کاهش پاسخ سازه در برابر بارهای دینامیکی به کار می‌روند. این میراگرها معمولاً از دو صفحه تشکیل شده است که با لغزش بر روی هم، نیروی اصطکاکی را

تولید می‌کنند. میراگرهای اصطکاکی غیرفعال قادر به تنظیم نیروی لغزش بر اساس پاسخ سازه نمی‌باشند. به عنوان مثال، در مورد زلزله‌های قوی، میراگر به طور کارآمدتری قادر به مستهلک نمودن انرژی زلزله نخواهد بود و همچنین در زلزله‌های متوسط و ضعیف صفحات مورد نظر لغزشی را نخواهند داشت [۱۴].

مواد پیزوالکتریک دارای یک ویژگی منحصر به فردی می‌باشند که در هنگام اعمال ولتاژ به این مواد، تنش و یا کرنش تولید می‌کنند. میراگرهای اصطکاکی مجهز به فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک نوع جدیدی از ابزارهای نیمه‌فعال می‌باشند که صفحات پیزوالکتریک برای تعدیل کردن نیروی اصطکاکی میراگر و به منظور تأمین یک سطح قابل قبول از نیروی اصطکاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. حالت کاربردی این میراگرها در مهاربند شورون و به صورت شکل (۲) و (۳) مورد استفاده قرار می‌گیرند، که در این مطالعه نیروی میراگرها در تراز طبقات و به منظور مدل‌سازی واقعی و کاربردی آن اعمال گشته است [۱۶].



شکل ۲- نمای اتصال میراگر اصطکاکی به مهاربند و تیر طبقه



شکل ۳- نحوه قرارگیری فعال‌کننده پیزوالکتریک بر روی میراگر اصطکاکی

صفحات پیزوالکتریک در بین صفحات خارجی قرار می‌گیرند. صفحات پیزوالکتریک بعد از دریافت ولتاژ فعال گشته و متناسب با ولتاژ ورودی نیروی عمودی سطح را تولید می‌نماید. سوراخ‌های ایجاد شده در ورق‌های اتصال خریاها و ورق‌های خارجی از نوع سوراخ‌های لوبیایی استاندارد می‌باشد. زمانی که نیروی کششی و یا فشاری وارده بر اتصال از نیروی اصطکاکی بین سطوح بیشتر باشد، صفحه اصلی^۱ نسبت به صفحات اتصال خریایی لغزش نسبی خواهد داشت. نیروی

رابطه زیر به دست آورد.

$$f(t) = 2\mu N_p(t) \operatorname{sgn}[\dot{x}(t)] \quad (15)$$

در رابطه (۱۵) $\dot{x}$ سرعت نسبی طبقه مورد نظر و μ ضریب اصطکاک میراگر مورد نظر است که در جدول مقدار آن آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات میراگر پیزوالکتریک استفاده شده در مطالعه [۱۶]

مشخصه	نماد	مقدار	واحد
ضریب کرنش صفحات پیزوالکتریک	d_{33}	550×10^{-12}	m/V
مدول یانگ صفحات پیزوالکتریک	E_p	7×10^{10}	MPa
مدول یانگ پیچ ها	E_b	2×10^{11}	MPa
مساحت هر لایه پیزوالکتریک	A_p	$6/25 \times 10^{-4}$	mm ²
سطح مقطع پیچ	A_b	$3/14 \times 10^{-4}$	mm ²
تعداد لایه های پیزوالکتریک	N	۱۰۰	-
ضخامت هر لایه پیزوالکتریک	h	2×10^{-4}	m
ارتفاع صفحات پیزوالکتریک	L_p	2×10^{-2}	m
طول پیچ ها	L_b	16×10^{-2}	m
ضریب اصطکاک بین صفحات میراگر	μ	۰/۲	-

میراگرهای اصطکاکی مجهز به فعال کننده پیزوالکتریک در حالت واقعی و کاربردی معمولاً مابین مهاربند شورون و تیر کف طبقه نصب می گردند؛ که در این مطالعه دو حالت میراگر اصطکاکی با فعال کننده های پیزوالکتریک و میراگر اصطکاکی بدون فعال کننده مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- الگوریتم کنترلی منطق فازی مورد استفاده

امروزه تعداد زیادی از الگوریتم های کنترل برای سیستم های کنترل نیمه فعال پیشنهاد شده است که به عنوان نمونه می توان به الگوریتم کنترل Skyhook و یا الگوریتم کنترل Lyapunov و غیره اشاره نمود. این الگوریتم ها مقادیر ولتاژ صفر و یا حداکثر را به سیستم کنترلی اعمال می کنند و سطح متوسطی را بین این دو سطح در نظر نمی گیرند. از طرفی تغییرات سریع در ولتاژ در برابر بارهای لحظه ای و با مدت زمان کم باعث افزایش پاسخ سازه و احتمال ایجاد خرابی موضعی در بخش هایی از سازه می گردد. بنابراین نیاز به یک الگوریتم کنترلی که بتواند به طور تدریجی ولتاژ مورد نیاز را تغییر دهد، احساس می گردد. تغییرات

اصطکاک ایجاد شده در جهت مخالف نیروی خارجی ایجاد می گردد و بنابراین بخشی از نیروی خارجی زلزله توسط نیروی اصطکاکی ایجاد شده در میراگر اصطکاکی مستهلک می گردد. مشخصات مکانیکی صفحات پیزوالکتریک مورد استفاده در تحقیق حاضر در جدول (۲) نشان داده شده است.

N_b و N_p که به ترتیب نیروی عمودی بین صفحات پیزوالکتریک تحت اثر میدان الکتریکی و نیروی عمودی ناشی از پیچ ها می باشد، با استفاده از روابط (۸) و (۹) به محاسبه می گردند [۱۶].

$$N_p = n \varepsilon_p E_p A_p \quad (8)$$

$$N_b = 4 \varepsilon_b E_b A_b \quad (9)$$

در رابطه (۸) و (۹) مقادیر ε_p و ε_b با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) به دست می آید.

$$\varepsilon_p = \frac{(\Delta L_v - \Delta L)}{L_p} \quad (10)$$

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta L}{L_b} \quad (11)$$

در روابط (۱۰) و (۱۱) ΔL_v با استفاده از رابطه (۱۲) به دست می آید.

$$\Delta L_v = \frac{d_{33} V L_p}{h} \quad (12)$$

در روابط ذکر شده، ΔL_v تغییر طول صفحات پیزوالکتریک در حضور میدان الکتریکی، ΔL تغییر طول پیچ ها، E_p مدول یانگ صفحات پیزوالکتریک، E_b مدول یانگ پیچ ها، d_{33} ضریب کرنش صفحات پیزوالکتریک، V ولتاژ اعمالی به صفحات پیزوالکتریک، A_p مساحت صفحات پیزوالکتریک، A_b سطح مقطع هر پیچ، L_p ارتفاع کل صفحات پیزوالکتریک، L_b طول پیچ ها، h ضخامت هر لایه پیزوالکتریک، n تعداد صفحات پیزوالکتریک مورد استفاده می باشد. با فرض اینکه از چهار پیچ در اتصال استفاده شده و $N_b = N_p$ می باشد، N_p را می توان با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه نمود [۱۶].

$$N_p = k \frac{d_{33} V}{h} \quad (13)$$

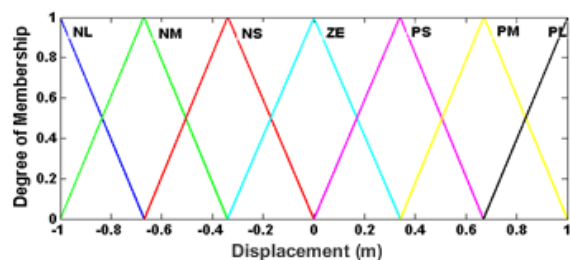
در رابطه (۱۳) ضریب k ، با استفاده از رابطه (۱۴) به دست می آید.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{n E_p A_p} + \frac{L_b}{4 L_p E_b A_b}} \quad (14)$$

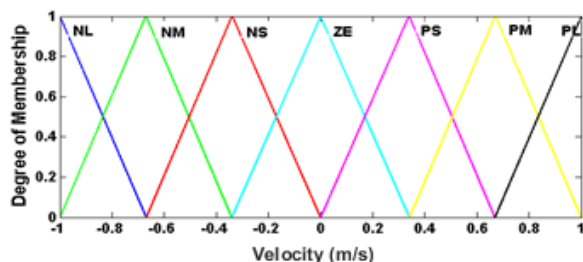
نیروی اصطکاکی میراگرهای اصطکاکی مجهز به فعال کننده های پیزوالکتریک اصطکاکی را می توان با استفاده از



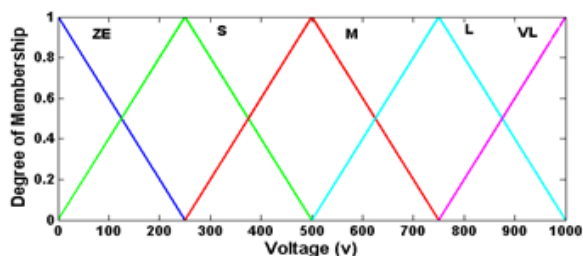
بر اساس قوانین تعریف شده در سیستم استنتاج فازی تولید می‌گردد. این خروجی همان ولتاژ مورد نیاز جهت کنترل ارتعاشات سازه می‌باشد. با اعمال این ولتاژ به پیزوالکتریک‌ها، پیزوالکتریک‌ها نیروی عمودی سطح را جهت تنظیم نیروی اصطکاکی تغییر می‌دهند. توابع عضویت مثلثی فازی برای مقادیر ورودی و خروجی که به مقدار حداکثر نرمالیزه شده‌اند، در شکل‌های (۵) تا (۷) نشان داده شده است.



شکل ۵- توابع عضویت مثلثی متغیر تغییر مکان ورودی [۱۴]



شکل ۶- توابع عضویت مثلثی متغیر سرعت ورودی [۱۴]

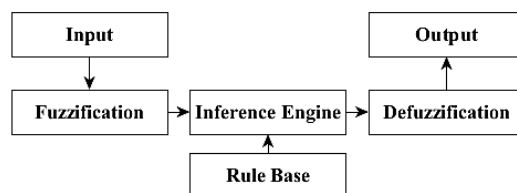


شکل ۷- توابع عضویت مثلثی متغیر ولتاژ خروجی [۱۴]

متغیرهای زبانی اختصاص داده شده به مقادیر ورودی فازی در جدول (۳) و متغیرهای زبانی اختصاص داده شده به مقادیر خروجی در جدول (۴) نشان داده شده است؛ همچنین قوانین فازی مورد استفاده برای کنترل در جدول (۵) نمایش داده شده است. برای تعریف و پیاده‌سازی سیستم کنترلی، که شامل توابع، متغیرهای فازی و قوانین تصمیم‌گیری می‌باشد، از مطالعه Ozbulut و همکارانش استفاده شده و در جعبه ابزار نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است.

تدریجی ولتاژ بین دو سطح ولتاژ صفر و حداکثر، طراحی سیستم کنترل برای یک حالت متوسط را امکان‌پذیر می‌نماید. کنترل منطق فازی یک روش موثر برای کنترل سازه‌ها می‌باشد، که یک چهارچوب ساده و قدرتمندی را برای تصمیم‌گیری با وجود عدم قطعیت‌ها در سیستم‌های غیرخطی پیچیده ایجاد می‌کند. کنترل فازی به منظور بیان ارتباط بین مقادیر ورودی و خروجی به جای استفاده از روابط ریاضی پیچیده از متغیرهای زبانی استفاده می‌کند. به دلیل قدرت ذاتی و سادگی کنترل‌کننده‌های فازی، این کنترل‌کننده‌ها امروزه مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در این مطالعه از الگوریتم کنترل منطق فازی به منظور تنظیم ولتاژ مورد نیاز جهت فعال‌نمودن پیزوالکتریک‌ها استفاده شده است [۱۷]. ساختار اصلی یک کنترل‌کننده فازی در شکل (۴) نشان داده شده است.

Fuzzy Logic Controller (FLC)



شکل ۴- ساختار کلی سیستم استنتاجی کنترل فازی

طراحی یک سیستم کنترل فازی شامل چند مرحله می‌باشد. مرحله نخست فازی‌سازی است؛ که شامل تبدیل مقادیر ورودی به مقادیر زبانی فازی از طریق اختصاص توابع عضویت به هر ورودی و خروجی می‌باشد. گام بعدی مرحله تصمیم‌گیری می‌باشد که با تعدادی قواعد اگر-آنگاه فازی، قوانین فازی ارتباط بین مقادیر ورودی و خروجی را ایجاد می‌کند. با استفاده از مکانیزم استنباطی فازی، قوانین فازی به منظور ایجاد یک خروجی بر اساس مقادیر ورودی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. مرحله نهایی، مرحله غیرفازی‌سازی می‌باشد، که هدف از آن تبدیل متغیر خروجی فازی به یک متغیر غیرفازی می‌باشد. عملکرد کنترل‌کننده‌های فازی به پارامترهای مختلف طراحی از قبیل انتخاب توابع عضویت و تعریف قوانین فازی بستگی دارد. همچنین داشتن قوانین فازی موثر و قابل اعتماد به منظور ایجاد یک سطح مطلوب، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این مطالعه به منظور تولید نیروی کنترلی مناسب برای گام‌های زمانی مختلف زلزله از تغییر مکان نسبی و سرعت نسبی دو طبقه متوالی است [۱۴]. مقادیر سرعت و تغییر مکان نسبی طبقات به عنوان ورودی تصمیم‌گیری فازی می‌باشد و خروجی این ورودی‌ها

جدول ۳- متغیرهای زبانی اختصاص داده شده به مقادیر ورودی فازی

متغیر زبانی	سرعت و تغییر مکان
NL	مقادیر بزرگ منفی
NM	مقادیر متوسط منفی
NS	مقادیر کوچک منفی
ZE	صفر
PS	مقادیر کوچک مثبت
PM	مقادیر متوسط مثبت
PL	مقادیر بزرگ مثبت

جدول ۴- متغیرهای زبانی اختصاص داده شده به مقادیر خروجی

متغیر زبانی	ولتاژ
VL	خیلی بزرگ
L	بزرگ
M	متوسط
S	کوچک
ZE	صفر

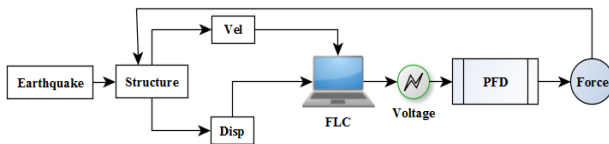
جدول ۵- قوانین فازی مورد استفاده در مطالعه حاضر [۱۴]

جایجایی طبقه							
PL	PM	PS	ZE	NS	NM	NL	ولتاژ
ZE	S	M	L	L	NL	VL	NL
S	ZE	S	M	L	L	VL	NM
M	S	ZE	S	M	L	L	NS
L	M	S	ZE	S	M	L	ZE
L	L	M	S	ZE	S	M	PS
VL	L	L	M	S	ZE	S	PM
VL	VL	L	L	M	S	ZE	PL

۲-۲- ایجاد ارتباط بین نرم افزار OpenSees و MATLAB

به دلیل اینکه مدل مورد استفاده برای آنالیز دینامیکی در نرم افزار تحلیل OpenSees مدل گشته است و از طرفی چون کنترل کننده فازی در نرم افزار MATLAB پیاده سازی شده است، بنابراین نیاز است تا این دو نرم افزار به منظور انجام روند کنترل با هم ارتباط داشته باشند. یکی از امکاناتی که زبان برنامه نویسی TCL/TK در اختیار کاربران قرار می دهد، امکان ایجاد ارتباط شبکه ای بین سرویس دهنده^۷ و سرویس گیرنده^۸ می باشد که به این روش TCP/IP برای این کار در محیط TCL از دستور سوکت^۹ استفاده می شود. این دستور یک شبکه ارتباطی را ایجاد می کند که در این شبکه، سرویس دهنده می تواند با سرویس گیرنده از طریق ایجاد کانال های خاصی ارتباط برقرار کند. در این روش ارتباط دو نرم افزار به یکدیگر، مدل ساخته شده در نرم افزار OpenSees

بسته نمی شود و از طریق ایجاد کانال ارتباطی نیروهای کنترلی محاسبه شده از نرم افزار MATLAB فراخوانی می شود و نیروی آن به مدل اعمال می گیرد و یک گام از تحلیل انجام می گردد. این روند تحلیل تا پایان زمان زلزله اعمالی به سازه ادامه می یابد [۱۸]. چرخه این فرآیند تحلیل در شکل (۸) نشان داده شده است.



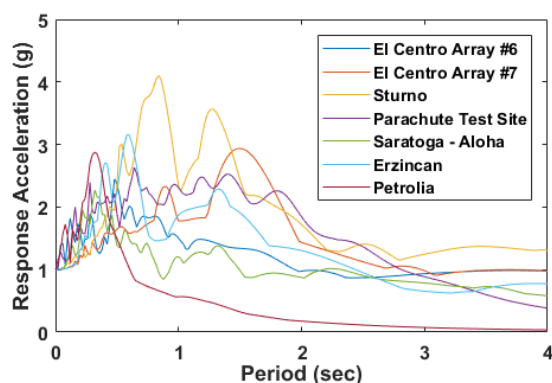
شکل ۸- فرآیند سیستم کنترلی مورد بررسی در این مطالعه

۳- زلزله های اعمال شده به مدل برای آنالیز دینامیکی سازه

انتخاب شتاب نگاشت های مناسب، یکی از قدم های بسیار مهم در تحلیل تاریخیچه زمانی است، زیرا نتایج حاصل از این نوع تحلیل به طور محسوسی به شتاب نگاشت های انتخاب شده بستگی دارند و انتخاب یک شتاب نگاشت نامناسب می تواند نتایج را به طور کلی مخدوش سازد. شتاب نگاشت های مورد نظر برای تحلیل تاریخیچه زمانی باید تا حد امکان ویژگی هایی مشابه با زلزله محتمل در ساختگاه (محل احداث بنا) داشته باشند و به عبارت دیگر باید شرایط زلزله طرح را اقناع کنند. به این منظور توصیه می شود تا ویژگی های شتاب نگاشت های انتخابی مانند بزرگا، فاصله از گسل و چشمه لرزه زا تا جای ممکن نظیر محل احداث بنا باشند [۱۹]. در این پژوهش سازه مورد بررسی تحت اثر ۱۴ زلزله مختلف قرار گرفته است؛ که ۷ شتاب نگاشت حوزه دور از گسل و ۷ شتاب نگاشت حوزه نزدیک گسل می باشد.

زلزله های انتخاب شده برای اعمال نیروی زلزله با استفاده از دستورالعمل FEMA P695 [۲۰] انتخاب شده است که در جداول (۶) و (۷) معرفی شده است.

بررسی ویژگی های کلی نگاشت های میدان نزدیک زمین لرزه ها نشان می دهد که رکوردهای ثبت شده در میدان نزدیک عموماً دارای یک پالس شدید و غالب با پریود بلند در نگاشت تاریخیچه زمانی سرعت و جایجایی هستند؛ که زلزله های انتخاب شده به منظور تحلیل سازه بر اساس پیشنهاد دستورالعمل FEMA P695 می باشد. طیف پاسخ شتاب زلزله های انتخاب شده در شکل های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- طیف پاسخ شتاب زلزله‌های حوزه نزدیک

۴- ارائه و تفسیر نتایج

به منظور بررسی عملکرد سیستم‌های کنترلی، سازه مورد نظر تحت اثر چهارده زلزله ذکر شده در جدول (۶) و (۷) تحلیل می‌گردد. تحلیل‌های دینامیکی انجام شده برای حداکثر شتاب‌های زلزله ۰/۱g تا ۱g به صورت افزایشی انجام گردیده است. برای بررسی اثربخشی میراگر مورد مطالعه پاسخ دینامیکی طبقه پنجم برای جابجایی و شتاب و عکس‌العمل تکیه‌گاهی در تراز پایه برای برش و لنگر پایه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از هشت معیار ارزیابی استفاده گردیده است که چهار معیار اول مربوط به نسبت حداکثر حالت کنترل شده به حالت کنترل نشده می‌باشد. معیارهای مورد نظر برای ارزیابی عملکرد سیستم کنترلی در جدول (۸) معرفی گشته است.

جدول ۸- معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم کنترلی

عنوان	رابطه	معیار
تغییر مکان طبقه پنجم	$\frac{\max x_c(t) }{\max x_u(t) }$	j_1
شتاب طبقه پنجم	$\frac{\max \ddot{x}_c(t) }{\max \ddot{x}_u(t) }$	j_2
برش در تراز پایه	$\frac{\max V_c(t) }{\max V_u(t) }$	j_3
لنگر در تراز پایه	$\frac{\max M_c(t) }{\max M_u(t) }$	j_4

علاوه بر چهار معیار معرفی شده در جدول (۸)، چهار معیار دیگر هم به عنوان نسبت مقادیر RMS تغییر مکان و شتاب طبقه پنجم و نسبت مقادیر RMS برش و لنگر پایه در نظر گرفته شده است. پارامتر جذر میانگین مربعات داده‌ها (RMS) در رابطه (۱۶) معرفی شده است. هر چه مقدار RMS داده‌ها کمتر باشد به این معنی است که مقادیر اوج داده‌ها بهتر

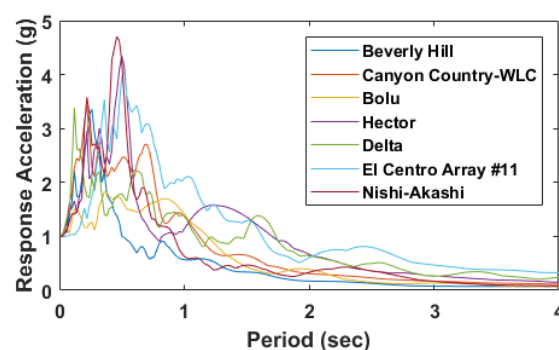
برای اینکه اثر بیشینه‌شتاب رکوردهای زلزله، بر سیستم کنترلی مورد مطالعه سنجیده شود، آنالیز IDA برای بیشینه شتاب‌های ۰/۱g تا ۱/۰g با گام ۰/۱g انجام شده است؛ تا عملکرد میراگر اصطکاکی برای بیشینه شتاب‌های مختلف تعیین گردد.

جدول ۶- مشخصات زلزله‌های حوزه دور اعمالی به سازه

شماره	زلزله	ایستگاه	PGA (g)
۱	نورت ریج	بورلی هیلز	۰/۵۲
۲	نورت ریج	کنیون کانتری	۰/۴۸
۳	دوچی ترکیه	بلو	۰/۸۲
۴	هکتور ماین	هکتور	۰/۳۴
۵	امپریال ولی	دلتا	۰/۳۵
۶	امپریال ولی	السترو ردیف ۶	۰/۳۸
۷	کوبه-ژاپن	نیشی-آکاشی	۰/۵۱

جدول ۷- مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک اعمالی به سازه

شماره	زلزله	ایستگاه	PGA (g)
۱	امپریال ولی ۶	السترو اری ۶	۰/۴۴
۲	امپریال ولی ۶	السترو ردیف ۷	۰/۴۶
۳	ایرپینیا-ایتالیا (۰۱)	استرنو	۰/۳۱
۴	سوپراستیشن هیلز ۲	پرچیوت تست سایت	۰/۴۲
۵	لوما پریتا	ساراتوگا-آلوا	۰/۳۸
۶	ارزیکن - ترکیه	ارزیکن	۰/۴۹
۷	کپه مندوسینو	پترولیا	۰/۶۳



شکل ۹- طیف پاسخ شتاب زلزله‌های حوزه دور

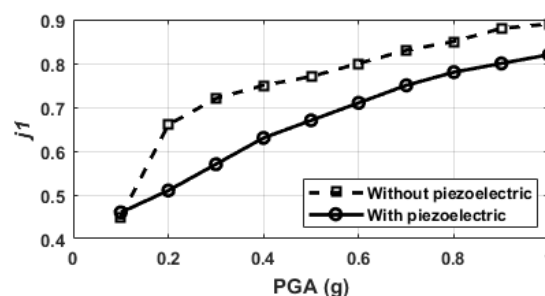


کنترل شده و به نحوی میزان انحراف معیار از میانگین داده‌ها کمتر می‌باشد.

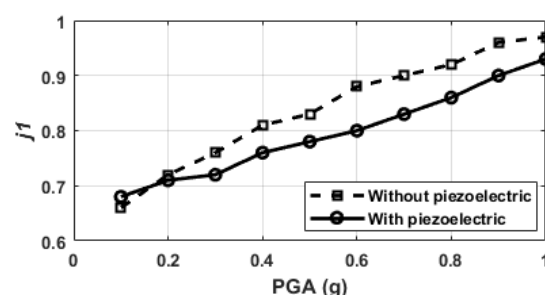
$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i^2}{n}} \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)، R_i پاسخ موردنظر و n تعداد داده‌ها می‌باشد.

نمودارهای مربوط به متوسط معیار جابجایی (j_1) برای میراگر اصطکاکی در حالت غیرفعال و نیمه‌فعال مجهز به فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها می‌توان دریافت که تنظیم نیروی اصطکاکی لازم از جانب فعال‌کننده‌ها و میراگر اصطکاکی به طور مناسبی انجام شده است و سیستم میراگر مورد نظر عملکرد بهتری را نسبت به حالت غیرفعال داشته است.



شکل ۱۱- نمودار متوسط معیار (j_1) برای زلزله‌های حوزه دور



شکل ۱۲- نمودار متوسط معیار (j_1) برای زلزله‌های حوزه نزدیک

در تعریف توابع عضویت سیستم‌های استنتاج فازی از دانش افراد خبره، هم‌چون مطالعات انجام گرفته توسط Ozbulut و همکارانش [۱۴]، استفاده شده است که نتایج بدست آمده از تحلیل‌ها نشان‌دهنده این است که این توابع و بازه‌های تعریف‌شده برای ورودی‌ها و خروجی‌ها سیستم استنتاج مناسب می‌باشند.

برای شدت زلزله کمتر از $0.3g$ با توجه به اینکه ارتعاش

سازه کم می‌باشد و حرکت سازه به صورت صلب‌گونه انجام می‌گیرد، و نیروی اعمالی از جانب میراگر مجهز به فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک بیشتر از مقدار لازم جهت کنترل می‌باشد؛ این عامل به دلیل عدم تصمیم‌گیری مناسب سیستم استنتاجی و قوانین فازی تعریف‌شده برای شتاب‌های پایین‌تر از $0.3g$ می‌باشد. این در حالی است که برای شدت‌های بالاتر از $0.3g$ ، سیستم کنترل فازی به خوبی تصمیم‌گیری نموده و نیروی مناسب لازم برای کنترل ارتعاش سازه تولید کرده است. همچنین روند تصمیم‌گیری سیستم کنترلی برای کنترل ارتعاش سازه برای شدت‌های بالای زلزله به خوبی صورت پذیرفته است. میراگر اصطکاکی در حالت غیرفعال با یک میزان نیروی اصطکاکی ثابت تنظیم می‌گردد و با افزایش شتاب زلزله تغییرات معیار مربوط به تغییر مکان (j_1) حالت صعودی را نشان می‌دهد؛ زیرا میراگر اصطکاکی در حالت غیرفعال نمی‌تواند خود را با رفتار سازه برای شدت‌های مختلف زلزله مطابقت دهد؛ این در حالی است که در حالت نیمه‌فعال سیستم استنتاجی فازی نیروی کنترل سازه را به خوبی تصمیم و تولید می‌نماید.

متوسط معیارهای ارزیابی معرفی‌شده برای زلزله‌های اعمالی به سازه در جداول (۹) تا (۱۲) نمایش داده شده است. این مقادیر برای معیارهای ارزیابی بررسی‌شده نشان‌دهنده بهبود رفتار سازه در برابر نیروی زلزله می‌باشد. همچنین با مقایسه جداول (۹) و (۱۱) که مربوط معیارهای j_1 تا j_4 می‌باشند، می‌توان دریافت که عملکرد میراگر اصطکاکی با فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک بهتر از حالت میراگر اصطکاکی در حالت غیرفعال می‌باشد.

جدول ۹- متوسط معیارهای حداکثر پاسخ سازه با فعال‌کننده‌های

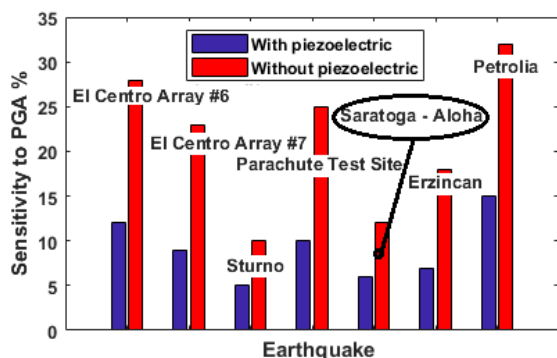
پیزوالکتریک

زلزله	j_1	j_2	j_3	j_4
حوزه دور	۰/۶۶	۰/۷۸	۰/۶۲	۰/۶۳
حوزه نزدیک	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۸۲

جدول ۱۰- متوسط معیارهای جذر میانگین مجموع مربعات پاسخ

سازه بدون فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک

زلزله	j_5	j_6	j_7	j_8
حوزه دور	۰/۵۵	۰/۷۳	۰/۵۶	۰/۵۶
حوزه نزدیک	۰/۵۹	۰/۸۷	۰/۶۴	۰/۶۴



شکل ۱۴- نمودار حساسیت پاسخ تغییر مکان سازه به شدت‌های مختلف زلزله‌های حوزه نزدیک

میزان متوسط حساسیت پاسخ تغییر مکان بام سازه به زلزله‌های حوزه دور نسبت به زلزله‌های حوزه نزدیک در حالت غیرفعال ۴۳ درصد کمتر می‌باشد که این میزان حساسیت برای حالت کنترل نیمه‌فعال نیز ۳۳/۱ درصد می‌باشد؛ که در حالت کنترل نیمه‌فعال با توجه به تطبیق‌پذیری الگوریتم منطق فازی برای زلزله‌ها و بیشینه شتاب‌های مختلف کمتر از حالت غیرفعال می‌باشد.

طیف پاسخ شتاب سازه یک‌درجه آزادی (SDOF) برای زلزله‌های مختلف در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. هر کدام از این زلزله‌ها دارای یک محتوای فرکانسی مشخصی می‌باشد؛ که هر چه فرکانس زلزله به فرکانس سازه نزدیک باشد، وضعیت سازه به حالت تشدید نزدیک‌تر می‌گردد و بنابراین پاسخ سازه افزایش می‌یابد؛ یکی از علت‌های متفاوت بودن پاسخ سازه به زلزله‌های مختلف نیز همین عامل می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه جهت کنترل ارتعاشات سازه پنج طبقه از میراگرهای اصطکاکی با فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک و بدون فعال‌کننده (حالت غیرفعال) استفاده شده است. مدل‌سازی مدل سازه در نرم‌افزار OpenSees انجام گشته است و سیستم کنترلی سازه برای حالت نیمه‌فعال در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است. ارتباط این دو نرم‌افزار جهت انجام کنترل نیمه‌فعال به روش TCP/IP برقرار شده است. تحلیل دینامیکی افزایشی برای هفت زلزله حوزه دور و هفت زلزله حوزه نزدیک از بیشینه شتاب ۰/۱g تا ۱g انجام گردیده است. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده و نتایج به دست آمده می‌توان گفت که به کمک میراگرهای اصطکاکی مجهز به فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک متوسط معیار مربوط به تغییر مکان (j_1) برای حالت نیمه‌فعال

جدول ۱۱- متوسط معیارهای حداکثر پاسخ سازه بدون فعال‌کننده‌های

پیزوالکتریک

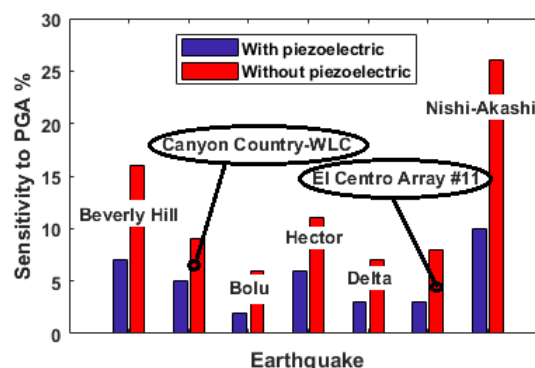
زلزله	j_1	j_2	j_3	j_4
حوزه دور	۰/۷۵	۰/۸۱	۰/۷۲	۰/۷۲
حوزه نزدیک	۰/۸۶	۰/۸۲	۰/۸۵	۰/۸۵

جدول ۱۲- متوسط معیارهای جذر میانگین مجموع مربعات پاسخ

سازه بدون فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک

زلزله	j_5	j_6	j_7	j_8
حوزه دور	۰/۶۰	۰/۶۵	۰/۶۱	۰/۶۱
حوزه نزدیک	۰/۷۱	۰/۷	۰/۷۲	۰/۷۲

نمودار میله‌ای شکل‌های (۱۳) و (۱۴) حساسیت متوسط پاسخ تغییر مکان سازه را نسبت به شدت‌های مختلف زلزله در دو حالت کنترل با میراگرهای اصطکاکی غیرفعال و نیمه‌فعال تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک نشان می‌دهد. با بررسی این نمودار می‌توان دریافت که حساسیت حالت کنترل نیمه‌فعال نسبت به حالت کنترل غیرفعال با میراگر اصطکاکی برای شدت‌های مختلف زلزله کمتر می‌باشد و این امر به این دلیل است که در حالت کنترل نیمه‌فعال انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری تصمیم‌گیری فازی جهت تولید نیروی اصطکاکی مناسب می‌باشد. اما در حالت میراگر اصطکاکی غیرفعال، چون میراگر برای یک حد مشخص نیروی اصطکاکی تنظیم می‌شود، در این حالت میراگر نمی‌تواند خود را برای شدت‌های مختلف نیروی زلزله تطبیق و تنظیم نماید؛ که این محدودیت در حالت نیمه‌فعال به خوبی برطرف شده است و رفتار سازه بهبود چشم‌گیری را از خود نشان داده است.



شکل ۱۳- نمودار حساسیت پاسخ تغییر مکان سازه به شدت‌های مختلف زلزله‌های حوزه دور



- [6] Udawadia, F., Hosseini, M. and Wada, B. (1998), "Distributed Control of Large Scale Structural Systems", *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 377–387.
- [7] Chen, G. and Chen, C. (2000), "Behavior of Piezoelectric Friction Dampers under Dynamic Loading", In *Smart Structures and Materials: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, Vol. 3988, pp. 54–64.
- [8] Dyke, S.J., Spencer Jr, B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D. (1998), "An Experimental Study of MR Dampers for Seismic Protection", *Smart materials and structures*, Vol.7, pp.693–703.
- [9] Chen, G. and Chen, C. (2004), "Semi-Active Control of the 20-Story Benchmark Building with Piezoelectric Friction Dampers", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 130, No. 4, pp. 393–400.
- [10] Preumont, A., De Marneffe, B., Deraemaeker, A. and Bossens, F. (2008), "The Damping of a Truss Structure with a Piezoelectric Transducer", *Computers & structures*, Vol. 86, No. 3, pp. 227–239.
- [11] Muanke, P.B., Masson, P. and Micheau, P. (2008), "Determination of Normal Force for Optimal Energy Dissipation of Harmonic Disturbance in a Semi-Active Device", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 311, pp. 633–651.
- [12] Xu, Y. and Ng, C. (2008), "Seismic Protection of a Building Complex Using Variable Friction Damper: Experimental Investigation", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 134, No. 8, pp. 637–649.
- [13] Johnson, E.A., Ramallo, J.C., Spencer Jr, B.F. and Sain, M.K. (1998), "Intelligent base Isolation Systems", *Proceedings of the Second World Conference on Structural Control*, Vol. 1, No. 1, pp. 367–376.
- [14] Ozbulut, O.E. and Hurlebaus, S. (2010), "Fuzzy Control of Piezoelectric Friction Dampers for Seismic Protection of Smart base Isolated Buildings", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 6, pp. 1435–1455.
- [15] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H. and Fenves, G.L. (2006), *OpenSees Command Language Manual*, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center.
- [16] Zhang, Y., Li, S., Xie, K. and Qin, R. (2008), "Self-Tuning Fuzzy Control of the 20-Story Nonlinear Benchmark Building with Piezoelectric Friction Dampers", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- [17] Kim, H.-S. and Kang, J.-W. (2012), "Semi-Active Fuzzy Control of a Wind-Excited Tall Building Using Multi-Objective Genetic Algorithm", *Engineering Structures*, Vol. 41, pp. 242–257.
- [18] Bathaei, A. (2015), "Semi-Active Vibration Control of College Urban Bridge subjected to Earthquake Using MR Dampers and Fuzzy Logic Type-1 and Type-2 Algorithms", *Master of Science Thesis*, University of Tehran.
- [19] De Stefano, M., Marino, E.M. and Viti, S. (2005), "Valuation of Second Order Effects on the Seismic Response of Vertically Irregular RC Framed Structures", In *Proceedings of the 4th European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures*, CD ROM. Thessaloniki.
- [20] Zareian, F., Lignos, D.G. and Krawinkler, H. (2010), "Evaluation of Seismic Collapse Performance of Steel Special Moment Resisting Frames Using FEMA P695 (ATC-63) Methodology", In *Structures Congress 2010*, pp: 1275–1286.

نسبت به حالت غیرفعال برای زلزله‌های حوزه دور و زلزله‌های حوزه نزدیک به ترتیب ۱۲ و ۳/۴٪ بهبود نشان داده است. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت که عملکرد میراگر اصطکاکی در دو حالت غیرفعال و نیمه‌فعال برای زلزله‌های حوزه دور بهتر از زلزله‌های حوزه نزدیک می‌باشد. همچنین درصد بهبود برای متوسط معیار مربوط به شتاب (j_2) برای زلزله‌های حوزه دور به طور متوسط برابر ۳/۷٪ و برای زلزله‌های حوزه نزدیک برابر ۱/۲٪ می‌باشد؛ چون سازه در بیشینه شتاب‌های کمتر از ۰/۵g به صورت صلب ارتعاش می‌نماید و سیستم استنتاج فازی عملکرد ضعیف‌تری نسبت به ارتعاشات صلب دارد.

متوسط درصد بهبود معیار مربوط به برش پایه (j_3) حالت نیمه‌فعال نسبت به حالت غیرفعال برای زلزله‌های حوزه دور و نزدیک به ترتیب برابر ۱۳/۸ و ۴/۷٪ می‌باشد.

بر اساس نتایج به دست آمده برای متوسط پاسخ تغییرمکان سازه به شدت‌های مختلف زلزله می‌توان گفت که میزان متوسط حساسیت پاسخ تغییرمکان بام سازه به زلزله‌های حوزه دور نسبت به زلزله‌های حوزه نزدیک در حالت غیرفعال ۴۳٪ کمتر می‌باشد که این میزان کاهش حساسیت برای حالت کنترل نیمه‌فعال ۳۳/۱٪ می‌باشد. مقادیر کاهش برای معیارهای مختلف نشان می‌دهد که کاربرد سیستم کنترلی فازی با قوانین ارائه‌شده بسیار کارآمد بوده و تطبیق‌پذیری سیستم کنترل نیمه‌فعال با استفاده از منطق فازی نسبت به حالت غیرفعال را نشان می‌دهد.

۷- مراجع

- [1] Mashkat Razavi, H. (2014), "Intelligent Algorithms in Structural Control with Tuned Mass Dampers Considering Soil-Structure Interaction", *PhD Thesis*, University of Mashhad.
- [2] Unsal, M., Niezrecki, C. and Crane, C. (2003), "A New Semi-Active Piezoelectric-Based Friction Damper", In *Smart Structures and Materials: Damping and Isolation*, Vol. 5052, pp. 413–421.
- [3] Fisco, N. and Adeli, H. (2011), "Smart Structures: Part I—Active and Semi-Active Control", *Scientia Iranica*, Vol. 18, No. 3, pp. 275–84.
- [4] Di Leo R, Lecce L, Pecora R, Amoroso F. (2012), "Development of a New Semi-Active Friction Damper Using Piezoelectric Technology for the Anti-Seismic Control of Civil Structures", *Mechanics and Control*, Vol. 31, pp. 1–5.
- [5] Kamada, T., Fujita, T., Hatayama, T., Arikabe, T., Murai, N., Aizawa, S. and Tohyama, K. (1997), "Active Vibration Control of Frame Structures with Smart Structures Using Piezoelectric Actuators (Vibration Control by Control of Bending Moments of Columns)", *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, pp. 479–488.



- ¹ Stick-Slip
- ² Piezoelectric
- ³ Porototype
- ⁴ Lumped-Mass
- ⁵ Outer Plates
- ⁶ Main Plate
- ⁷ Server
- ⁸ Client
- ⁹ Socket

