

کاربرد منطق فازی در کنترل ارتعاشات سازه‌های مهندسی عمران

سیدحسین حسینی لواسانی^۱، سعید پورزینلی^۲،
عطا... حاجتی‌مدارایی^۳

دانشگاه گیلان - دانشکده فنی، گروه عمران
s_pourzeynali@yahoo.com

چکیده

استفاده از سیستم‌های کنترل در سازه‌های مهندسی عمران در سالهای اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. که اساساً این سیستم‌ها را می‌توان به چند دسته عمده کنترل غیر فعال، فعال، نیمه فعال و یا مرکب تقسیم کرد. در این پژوهش هدف، طراحی اجزاء سیستم کنترل فعال ATMD به منظور کاهش پاسخ سازه‌ها تحت اثر نیروی زلزله با استفاده از منطق فازی می‌باشد. در آن از یک جرم، فنر، میراگر و یک نیروی فعال به منظور کنترل ارتعاش سازه استفاده شده است. در این پژوهش سعی بر آن است که میزان نیروی فعال جهت کنترل ارتعاش سازه‌ها توسط منطق فازی تعیین گردد.

واژه‌های کلیدی: منطق فازی - فضای حالت - کنترل فعال (ATMD) - کنترل غیر فعال (TMD)

مقدمه

یکی از موارد اساسی در طرح ساختمان و دیگر سازه‌های مهندسی عمران کاهش ارتعاشات، خیزها و نیروهای به وجود آمده توسط نیروهای محیطی مثل باد و زلزله است. نظریات کنترل امروزی به طور موفقیت آمیزی در دهه‌های اخیر در زمینه‌های مختلف نظیر مهندسی مکانیک، الکترونیک، هوافضا، سازه و غیره به کار گرفته شده است. با وجود آن که تئوری کنترل فعال (Active control) در مهندسی عمران بسیار دیرتر از سایر علوم شروع شد، ولی کار برد آن در این شاخه نیز توسعه زیادی پیدا کرد و تحقیقات زیادی در این مورد صورت گرفته است [1-5]. کنترل فعال سازه‌های مهندسی عمران از جهات مختلف با کار برد آن در صنایع و سیستم‌های مکانیکی / الکتریکی مختلف است که برخی از آنها به شرح زیر است [6]: الف) سازه‌های مهندسی عمران عمدتاً دارای جرم زیاد و سنگین بوده و بنابراین نیروی فعال لازم برای کنترل آنها بزرگ می‌باشد. ب) این سازه‌ها قبل از اعمال نیروی دینامیکی خارجی نظیر نیروهای زلزله و باد، کاملاً ایستا، مطمئن و پایدار می‌باشند. پ) هدف از کاربرد سیستم کنترل در این سازه‌ها، کنترل ارتعاش در مقابل نیروهای دینامیکی خارجی (عمدتاً ناشی از باد

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه - گروه عمران

۲- استاد یار

۳- استادیار

و زلزله) می باشد. در روش کنترل فعال، سعی بر این است که با اعمال یک نیروی خارجی به سازه، بتوان عکس العمل های آن را در مقابل نیروهای شدید خارجی کاهش داد. برای تعیین مقدار نیروی فعال فوق، محققین از روش های مختلفی استفاده کرده اند [7-9]. تازه ترین روشی که در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته است، منطق فازی می باشد که امروزه در صنعت و همچنین در مهندسی سازه کاربرد فراوانی یافته است.

در سال ۱۹۶۵ میلادی، پرفسور لطفی زاده استاد دانشگاه کالیفرنیا در برکلی، یک دانشمند برجسته ایرانی الاصل، نظریه ی مجموعه های فازی (Fuzzy Sets) [10] را پایه ریزی نمود که تحول بزرگی در دنیای علم و تکنولوژی بوجود آورد. در این تئوری بر خلاف تئوری کلاسیک مجموعه ها، درجه ی عضویت یک عضو در یک مجموعه می تواند هر مقداری بین صفر و یک باشد، و بنابراین، این تئوری قادر بود بسیاری از مسائل زندگی روزمره ی بشری را که در آنها درجه ی عدم قطعیت بالا بود، حل و فصل نماید. بر مبنای نظریه مجموعه های فازی، تئوری منطق فازی (Fuzzy Logic) بنا نهاده شد که توانست بخش وسیعی از مسائل مربوط به کنترل پدیده ها در دنیای مهندسی را مرتفع سازد. منطق فازی در مسائل مهندسی سازه نیز کاربرد فراوانی یافته است. میشل سیمان (M. D. Symans) و استون کلی (S. W. Kelly) در سال ۱۹۹۹ [11]، به منظور کنترل ارتعاشات پل ها با روش نیمه فعال (Semi-Active Tuned Mass Damper) مطالعاتی را انجام داده اند که در آن برای تعیین پارامترهای مختلف سیستم کنترل، منطق فازی مورد استفاده قرار گرفت. آنان هم کنترل فعال (Active Tuned Mass Damper) و هم ترکیب کنترل نیمه فعال و جدا سازها (Base Isolation) را مورد بررسی قرار دادند، و در نهایت به این نتیجه رسیدند که منطق فازی در تعیین پارامترهای سیستم بسیار موثر است. هرچند که تا بحال تحقیقات زیادی در رابطه با کاربرد منطق فازی در سیستم های کنترل صورت گرفته است، ولی همچنان تلاشها در این زمینه به منظور استفاده ی بهتر و عملی تر از این تئوری ادامه دارد. مزیت های عمده کنترل با منطق فازی در مهندسی سازه عبارتند از [12]: الف) این سیستمها یک روش ریاضی جهت شناسایی سیستمها و کنترل آنها می باشد، و به سادگی می توانند یک مدل دقیق ریاضی جهت کنترل سیستم سازه ای طراحی می کند. ب) با وجود عدم قطعیت داده های ورودی نظیر باد، تحریک زلزله و داده های بدست آمده از سنسور های نصب شده در سازه سیستم کنترل فازی بسیار پایدار و مطمئن عمل می کند. ج) کنترلگر فازی توانایی کنترل رفتار غیر خطی سازه ها را که توسط تغییر شکلهای بزرگ، مصالح غیر خطی و یا تخریب صورت می گیرد را دارد. د) کنترل فازی را می تواند با تغییر قواعد و توابع عضویتش اصلاح کرد و حتی با تکنیکهایی آن را آموزش پذیر کرد.

در این مقاله، مسئله ی کاربرد سیستم کنترل فعال در سازه ها با استفاده از منطق فازی مورد بحث قرار گرفته است. در این سیستم، یک جرم متمرکز همراه یک فنر و میراگر در درجه آزادی که بیشترین ارتعاش را دارد قرار می گیرد و به کمک یک جک هیدرولیکی نیروی فعال لازم برای کنترل ارتعاش سازه به جرم مربوطه اعمال می گردد. برای تعیین مقدار نیروی لازم برای کاهش تغییر مکان درجه آزادی مذکور از منطق فازی استفاده شده است. از نتایج محاسبات عددی مشاهده می شود که با این سیستم می توان تغییر مکان درجات آزادی سازه را به مقدار زیادی کاهش داد.

فرضیات مساله

در این تحقیق فرضیات زیر در نظر گرفته می شود:

الف) مصالح و رفتار سازه خطی فرض شده است.

ب) در ساختمان بلند هر طبقه به عنوان یک درجه آزادی در جهت افقی در نظر گرفته شده، و جرم طبقه در این درجه ی آزادی متمرکز شده است.

پ) در ساختمانها سقف هر طبقه صلب در نظر گرفته شده است.

معادلات حرکت سیستم

معادله ی حرکت یک سازه تحت تاثیر نیروی زلزله، بدون اضافه نمودن هیچ گونه سیستم کنترل، به صورت زیر میباشد [12]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{r\}\ddot{u}_g \quad (1)$$

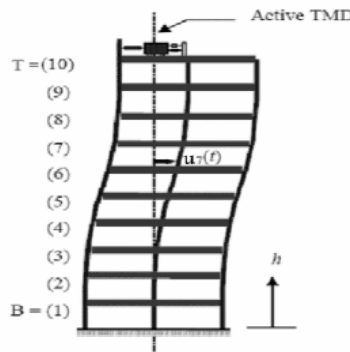
که در آن $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس جرم، ماتریس میرایی و ماتریس سختی سازه می باشد. ماتریس جرم $[M]$ یک ماتریس قطری $n \times n$ می باشد، که جرم درجات آزادی بر روی قطر آن قرار گرفته است. n نیز تعداد درجات آزادی سازه می باشد. ماتریس $[K]$ با توجه به سختی انتقالی درجات آزادی نسبت به هم ساخته می شود. ماتریس میرایی $[C]$ نیز متناسب با ماتریس های جرم و سختی سازه در نظر گرفته شده است که با استفاده از رابطه رایله به صورت زیر نوشته می شود [13].

$$[C] = a_0[M] + b_0[K] \quad (2)$$

$$a_0 = \xi_i \times \frac{2\omega_i \times \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \text{ و } b_0 = \xi_j \times \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (3)$$

که در آن a_0 و b_0 به ترتیب ضریب تناسب جرم و سختی، ω_i و ω_j به ترتیب فرکانس مود های i ام و j ام سازه و ξ_i و ξ_j به ترتیب در صد میرایی سازه ای این دو مود می باشند.

در این تحقیق، برای کاهش تغییر مکان درجات آزادی سازه در مقابل حرکت های ناشی از زلزله از سیستم کنترل فعال (ATMD) استفاده شده است، که این سیستم در ساده ترین حالت شامل یک جرم، فنر و میراگر به همراه یک سیستم اعمال نیروی فعال به جرم می باشد که معمولاً در مکانی که بیشترین میزان ارتعاش را دارد نصب می شود (شکل ۱).



شکل ۱- نمای سازه و محل قرار گیری ATMD بر روی آن

با افزودن این سیستم به سازه در واقع یک درجه ی آزادی به سازه اضافه می گردد. در اینجا لازم به یاد آوری است که این سیستم ها می توانند فقط در طبقات فوقانی و یا به تعداد بیشتر در طبقات مختلف نصب شوند که در این حالت می توان معادله ی حرکت سیستم را به شکل زیر نوشت:

$$[M_T]\{\ddot{u}\} + [C_T]\{\dot{u}\} + [K_T]\{u\} = -[M_T]\{\ddot{u}_g(t)\} + \{D\}F \quad (4)$$

آن نیروی F فعال وارد به جرم ATMD، $\{D\}$ بردار موقعیت است، که محل تاثیر نیرو فعال F را نشان میدهد و مقدار آن در درجات آزادی محل اثر F یک و در سایر درجات آزادی صفر است. $[M_T]$ ، $[K_T]$ و $[C_T]$ به ترتیب ماتریس های جرم، سختی و میرایی مربوط به کل سیستم مرکب حاصل می باشد که شامل خود سازه و سیستم های ATMD است و همه ی ماتریس ها مربعی به ابعاد $(n+m) \times (n+m)$ می باشند که n تعداد طبقات سازه و m تعداد ATMD می باشد.

از آن جاییکه در این تحقیق برای حل معادلات مرتبه دوم (۱) و (۴)، برای تعیین عکس العمل های سازه به ترتیب در حالت های کنترل نشده و کنترل شده، از نرم افزار MATLAB استفاده می گردد، لذا لازم است با مدل نمودن سیستم در فضای حالت، معادلات مرتبه ی دوم فوق به فرم فضای حالت نوشته شوند. برای این منظور، بردار حالت به صورت زیر در نظر گرفته می شود.

$$Z = \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \end{Bmatrix}; \dot{Z} = A_1 Z + B_1 \{eq\}; \{d\} = C_1 Z \quad (5)$$

$$\{eq\} = -\{r\}\ddot{u}_g + \{D\}F \quad (6)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} O_{(n+1) \times (n+1)} & I_{(n+1) \times (n+1)} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}; B_1 = \begin{bmatrix} O_{(n+1) \times (n+1)} \\ I_{(n+1) \times (n+1)} \end{bmatrix}; C_1 = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 1_n & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 1_{n+1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\{d\} = [u_n \dot{u}_n]^T \quad (8)$$

لازم به یاد آوری است که معادلات فوق برای حالتی که سیستم TMD به سازه اضافه شده است نوشته شده اند، و برای حالت بدون کنترل، بجای $(n+1)$ باید مقدار n را قرار داد.

$O_{(n+1) \times (n+1)}$ ماتریس مربعی به بعد $(n+1) \times (n+1)$ با درایه های صفر است؛ و $I_{(n+1) \times (n+1)}$ ماتریس یکه است. در ماتریس C_1 تمام درایه ها صفر هستند بجز ضرایب اعضایی از بردار فضای حالت که به عنوان بردار خروجی قرار میگیرند، که مقدار آنها ۱ می باشد. $\{d\}$ بردار خروجی فضای حالت و ورودی مدل فازی است، که شامل تغییر مکان و سرعت طبقه‌ی آخر است.

منطق فازی و کاربرد آن در تعیین مقدار نیروی فعال

در این مقاله، یک سیستم کنترل پسخور با استفاده از منطق فازی و به صورت یک سیستم ATMD برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها در مقابل نیروهای زلزله مورد بررسی قرار گرفته است.

تئوری مجموعه های فازی در سال ۱۹۶۵ توسط پرفسور لطفی زاده معرفی گردید. گرچه این نظریه در ابتدا با مخالفت‌هایی مواجه گشت ولی به مرور ارزش آن مشخص شد و کاربرد های آن آشکار گردید به طوری که امروزه در تمامی زمینه ها کاربرد پیدا کرده است. با این حال شاید بتوان گفت مهمترین کاربرد آن در سیستمهای پیشرفته ی کنترل است. بر مبنای نظریه ی مجموعه های فازی، منطق فازی پایه ریزی شد که در این منطق نیز ارزش درستی گزاره ها بین صفر تا صد در صد متغیر می باشد، در حالیکه در منطق سنتی (یا منطق سیاه و سفید) ارزش درستی گزاره ها یا صفر و یا صد در صد می باشد. در زیر شرح مختصری از منطق فازی و اصطلاحات به کار رفته در آن آمده است.

روند تحلیل فازی مطابق گامهای زیر می باشد :

گام اول در خلق یک مجموعه ی فازی تعریف بازه ی تغییرات آن است، این بازه ی تغییرات می تواند متناهی یا نامتناهی باشد بطوریکه محدوده ی تغییرات مقدار ورودی و مقدار خروجی غیر فازی در این محدوده قرار می گیرد. مرزهای مجموعه ی فازی توسط تابع عضویتی که روی محدوده ویژه ای از بازه فوق تعریف می شود، شرح داده میشود. توابع عضویت برای تعریف درجه عضویت یک عدد غیر فازی در مجموعه فازی می باشند. توابع عضویت می توانند هر شکلی را به خود بگیرند، که کاربردی ترین آنها مثلث، دوزنقه و تابع نرمال گوس است. در مجموعه های فازی درجه ی عضویت از صفر تا یک متغیر است. هر تابع عضویت یا مجموعه ی فازی می تواند به یک متغیر فازی که اصطلاحاً متغیر زبانی (Linguistic Variable) نام گرفته است تبدیل شود و نامی چون "تند"، "بزرگ" و یا "کوتاه" به خود بگیرد. معمولاً مقادیر غیر فازی در محدوده بازه ی تغییرات توسط دو یا چند مجموعه با هم همپوشانی دارند که در این صورت هر مقدار غیر فازی درجه ی عضویتی در هر یک از آن مجموعه ها پیدا می کند. برای ارتباط دادن بین متغیر های زبانی ورودی و خروجی قوانین فازی (Fuzzy Rules) تعبیه شده اند، که آنها در واقع شالوده ی منطق فازی را می سازند. هر قاعده ی فازی شامل یک جمله ی اگر... آنگاه... است، که قسمت مقدم (اگر) متغیر زبانی ورودی را نشان می دهد و قسمت تالی (آنگاه) خروجی فازی متناظر آن را نشان می دهد. این قواعد توسط یک فرد خبره پایه ریزی می شود. بعد از نوشته شدن قوانین فازی موتور استنتاج (Fuzzy Inference Engine) وارد عمل می شود. این موتور با استفاده از استلزام های منطقی، که مشهور ترین آنها ممدانی (Mamdani) و سوگنو (Sugeno) هستند، و قوانین فازی، متغیر های زبانی ورودی را به متغیر های زبانی خروجی تبدیل می کند.

در نهایت مقادیر ورودی غیر فازی توسط فازی ساز توسط فازی ساز - که مهمترین آنها منفرد، گوسین و مثلثی است - به متغیرهای زبانی تبدیل شده و توسط موتور استنتاج با کمک قوانین فازی، متغیرهای زبانی خروجی را تولید کرده و متغیرهای زبانی خروجی توسط غیر فازی ساز به مقادیر غیر فازی خروجی تبدیل می شود (شکل ۲).



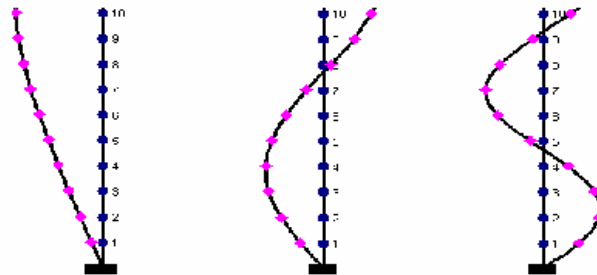
شکل ۲- ساختار اصلی سیستم های فازی با فازی ساز و غیر فازی ساز

مطالعه‌ی عددی

در این تحقیق، برای بدست آوردن نتایج عددی، یک ساختمان ۱۰ طبقه مورد بررسی قرار گرفته است، که بخشی از مشخصات سازه ای آن در جدول ۱ و شکل سه مود اول آن در شکل ۳ آمده است.

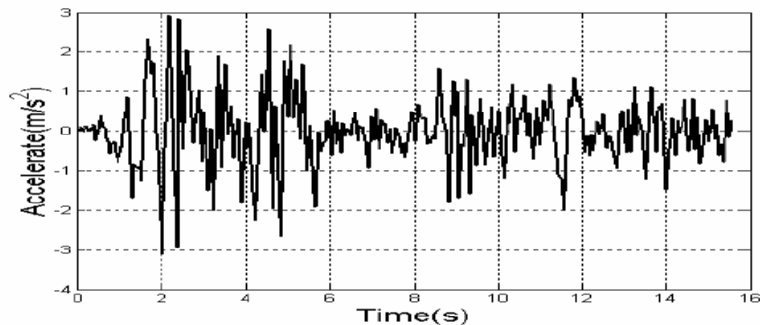
جدول ۱- مشخصات سازه

هر طبقات	جرم (تن)	سختی $(N/m) \cdot e8$
	۳۵۷	۶۵۵



شکل ۳- سه مود اول سازه به ترتیب از چپ به راست

این ساختمان به منظور بررسی اثر سیستم کنترل پیشنهادی در کاهش تغییر شکل‌های آن، تحت زلزله های متعددی مورد بررسی قرار گرفته است که در اینجا بدلیل محدودیت در تعداد صفحات مقاله، فقط به چاپ نتایج زلزله ال-سنتر و اکتفا شده است. نمودار مولفه ی افقی شتاب این زلزله در شکل ۴ آمده است .



شکل ۴- مولفه افقی شتاب زلزله ی ال- سنترو

برای کنترل ارتعاش سازه از دو روش کنترل غیر فعال و کنترل فعال با منطق فازی استفاده شده است. در کنترل غیر فعال سیستم کنترل شامل یک جرم و فنر و میراگر می باشد که در طبقه ی آخر نصب شده است.

در این روش برای تعیین پارامترهای سیستم TMD، ابتدا درصدی از جرم کل ساختمان به عنوان جرم TMD انتخاب میگردد. سپس با همساز (Tuned) کردن فرکانس این جرم نسبت به فرکانس اول سازه، که بیشترین اثر را در تغییر مکان سازه در مقابل زلزله دارد، با استفاده از رابطه ی زیر مقدار سختی K_T این سیستم تعیین میگردد:

$$K_T = M_T \times \omega_1^2 \quad (9)$$

که در آن M_T جرم TMD و K_T سختی TMD و ω_1 فرکانس مود اول سازه است. مرحله ی بعدی تعیین در صد میرایی این سیستم می باشد که آن هم معمولاً به طور فرضی انتخاب می گردد. معمولاً مقدار بهینه ی این پارامترها با بررسی های عددی طوری تعیین می گردند که بتوان با فراهم نمودن این مقادیر برای سیستم TMD، میزان تغییر مکان سازه را به حد اقل رساند، که در قسمت های بعدی برخی از نتایج آن آمده است.

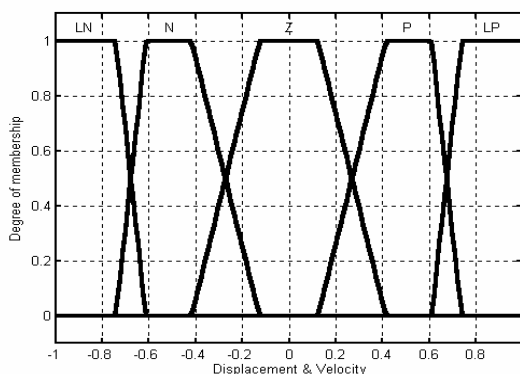
روش دوم استفاده از ATMD می باشد، که در این روش نیز مقادیر جرم و سختی فنر و در صد میرایی مطابق آنچه در بالا گفته شد تعیین میگردد، ولی مقدار نیروی فعال لازم جهت کنترل تغییر شکل سازه با استفاده از منطق فازی تعیین می گردد.

منطق فازی به کار گرفته شده در محاسبه ی نیروی فعال از روش ممدانی (Mamdani) است. در این روش قواعد فازی به شکل زیر بنا شده است.

$$\text{If } x_1 \text{ is } C_1^L \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } C_n^L \text{ then } y_1 \text{ is } D_1^L \text{ and } \dots \text{ and } y_n \text{ is } D_n^L \quad (10)$$

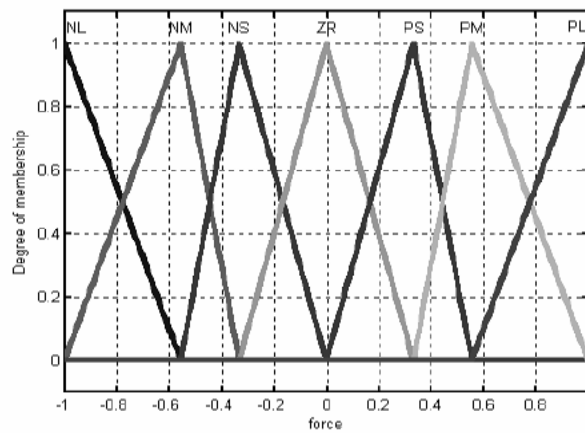
که C_i^L و D_i^L مجموعه های فازی هستند.

در این تحقیق، برای کنترل فعال سازه مذکور از دو ورودی به عنوان ورودی های فازی استفاده شده است که شامل تغییر مکان و سرعت طبقه ی آخر است، که برای هر کدام از آنها پنج عدد تابع عضویت (Membership Function) به شکل ذوزنقه ای طوری انتخاب شده است که دامنه ی تغییرات هر کدام از آنها را به طور کامل پوشش می دهد (شکل ۵). لازم به ذکر است که هر یک از ورودی ها شامل یک ضریب مقیاس بوده که در بازه [1 -1] ضرب می شوند. علامتهای اختصاری به کار رفته در این توابع عضویت ورودی به این شرح می باشند: LN=منفی بزرگ؛ N=منفی؛ Z=صفر؛ P=مثبت؛ LP=مثبت بزرگ



شکل ۵- توابع عضویت (Member Ship function) برای ورودی ها

همچنین از هفت تابع عضویت مثلثی در قسمت غیر فازی ساز استفاده شده است (شکل ۶). علامتهای اختصاری به کار رفته در این توابع عضویت خروجی به این شرح می باشند: NL=منفی بزرگ؛ ML=منفی متوسط؛ SN=منفی کوچک؛ ZR=صفر؛ SP=مثبت کوچک؛ MP=مثبت متوسط؛ PL=مثبت بزرگ



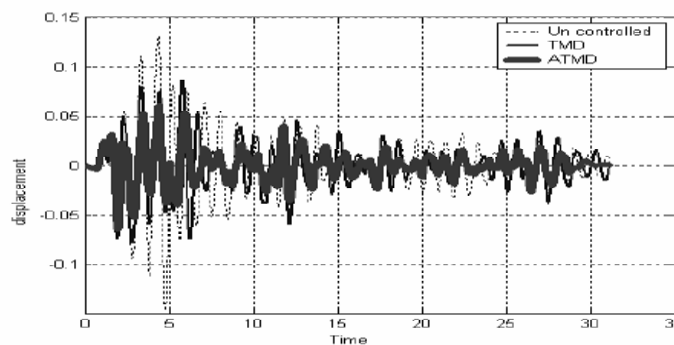
شکل ۶- توابع عضویت (Member Ship function) برای ورودی ها

به منظور برقراری ارتباط در بین متغیر های ورودی و خروجی در منطق فازی از ۲۵ قاعده (Rule Base) استفاده شده است که در جدول (۲) آمده اند.

جدول ۲ - قواعد فازی در روش ممدانی

تغییر مکان طبقه آخر	سرعت طبقه آخر				
	LN	N	Z	P	LP
LP	NS	NS	NM	NL	NL
P	NS	NM	NM	NM	NL
Z	PS	ZR	ZR	ZR	NS
N	PL	PM	PM	PM	PS
LN	PL	PL	PM	PS	PS

تاثیر سیستم پیشنهادی در کاهش تغییر مکان طبقه ی آخر ساختمان مورد نظر در شکل ۷ و جدول ۳ آمده است. در این شکل، تغییر مکان کنترل نشده و همچنین تغییر مکانهای کنترل شده تحت تاثیر TMD و ATMD نشان داد شده اند.

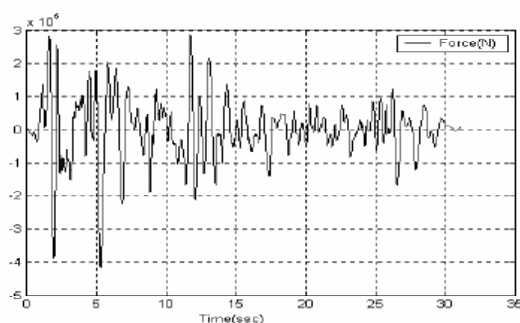


شکل ۷- تغییر مکان های کنترل شده و نشده ی طبقه ی آخر

جدول ۳- نسبت بیشترین تغییر مکان طبقات

Maximum relative displacement (El- Centro)				
Floor	Uncontrolled Response (m)	Controlled to uncontrolled response ratio		[4]/[3]
		TMD	ATMD	
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
1	0.022	0.64	0.45	0.70
2	0.044	0.61	0.4	0.66
3	0.064	0.60	0.4	0.66
4	0.083	0.61	0.38	0.62
5	0.099	0.63	0.38	0.60
6	0.113	0.63	0.39	0.62
7	0.126	0.62	0.36	0.58
8	0.135	0.62	0.36	0.58
9	0.143	0.60	0.35	0.58
10	0.147	0.59	0.36	0.61

مقادیر عددی حداکثر تغییر مکان طبقات مختلف ساختمان در جدول ۳ آمده است. در این جدول ستون دوم نشانگر حداکثر مقدار تغییر مکان کنترل نشده طبقات مختلف ساختمان، و ستون های سوم و چهارم، به ترتیب، بیانگر حداکثر مقدار تغییر مکان های کنترل شده ساختمان تحت اثر TMD و ATMD به تغییر مکان های فوق در حالت کنترل نشده در طبقات مختلف می باشد. بطوریکه از جدول ۳ بر می آید، مقدار نیروی خارجی لازم در سیستم کنترل ATMD که توسط منطق فازی تعیین شده و توسط جک های هیدرلیکی به سیستم اعمال میگردد نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق شکل حداکثر نیروی لازم برای کنترل فعال $4,117 \times 10^5$ نیوتن است که لازم است تکیه گاه های جک ها برای تحمل این نیرو طراحی گردند. این نیروی عظیمی بوده است و نیاز به ضربه زننده های قوی می باشد، که در مقایسه با نیروی فعالی که به روش کنترل بهینه خطی درجه دوم محاسبه می شود کمتر بوده است. خوشبختانه چنین ضربه زننده هایی به صورت عملی در این رنج نیرو ساخته شده و موجود است.



شکل ۸- نیروی فعال لازم برای کنترل

نتیجه گیری

الف) روش کنترل فعال (ATMD) با منطق فازی در کاهش تغییر مکان های سازه بسیار موثر می باشد .
 ب) روش ATMD توانسته تغییر مکان طبقه آخر ساختمان مورد نظر را در مقابل زلزله ال _ سنترو تا ۶۴٪ کاهش دهد ، در حالیکه میزان کاهش در روش TMD ۴۱٪ می باشد (جدول ۳) (شکل ۷) .
 ج) قواعد مربوط به (rule base) ها در موثر واقع شدن این روش در کاهش تغییر مکان ها ، نقش اساسی دارند.

مراجع

- [1] T. T. Soong and G. D. Manolis, "on Active Structures", ASCE, J. Struct. Engg, 113, p 2290–2301, 1987.
- [2] L. L. Chng, A. M. Reinhorn and T. T. Soong, "An Experimental Study of Active Structural Control", in Dynamic Response of Structures, eds G. C. Hart and R. B. Nelson, ASCE, Newyork, p795-802, 1986.
- [3] M. P. Singh, E. E. Metheu and L. E. Suarez, "Active and Semi-active Control of Structures Under Seismic Excitation", International J. of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, p193-213, 1997.
- [4] Y. Ribakou and J. Gluck, "Active Control of MDOF structures with Supplemental Electroheological Fluid Dampers", Int. J. of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol, 28, p143-156, 1999.
- [5] A. G. Schemmann and H. Allison Smith, "Vibration control of Cable-Stayed Bridges": parts 1 and 2, Int. J. of Earthquake Engineering and structural Dynamics, Vol. 27, p811-824, 1998.
- [6] N. J. Yang and T. T. Soong, "Recent Advances in Active Control of Civil Engineering Structures", Int. J. of probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 3, No4, p179-187, 1988.
- [7] N. J. Yang and P. Ghaemmaghami, "Instantaneous Optimal Control Algorithms for Experimental Verification and Demonstration", Internal Memo to SUNY for Experimental Verification. NSF Current No. CEE-83-11879, September 1988.
- [8] S. Sarabjeet and T. K. Datta, "Nonlinear Sliding Mode Control of Seismic Response of Building Frames", ASCE, J. of Engineering Mechanics, Vol. 126, No4, p340-347, 2000.
- [9] A. S. Ahlawat and A. Ramaswamy, "Multi Objective Optimal Structural Vibration Control Using Fuzzy Logic Control System", ASCE, J. of Structural Engineering, Vol. 8, p338-353, 1965.
- [10] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets", Information control, Vol. 8, p338-353, 1965.
- [11] M. D. Symans and S. W. Kelly, "Fuzzy Logic Control of Bridge Structures Using Intelligent Semi-active Seismic Isolation Systems", Int. J. of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, p37-60, 1999.
- [12] B. Samali, M. Al-Dawod, "Performance of a five-storey benchmark model using an active tuned mass damper and a fuzzy controller", International journal of engineering structures, Vol. 25, p1597-1610, 2003.
- [13] R. W. Clough and J. Penzien, "Dynamics of Structures", Second Edition, Mc Graw-Hill, Inc, 1993.