

کنترل سازه با میراگر جرمی تنظیم شده‌ی فعال با استفاده از کنترل کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ بازرسی برای تحریک لرزه‌ی

هاشم شریعتمدار (دانشیار)

سیامک گل‌نرگسی* (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۴ (ص. ۳۲-۳۱)
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۱/۲، ص. ۳۲-۳۱

این پژوهش به کاربرد کنترل کننده‌ی فازی نوع ۲ بازرسی در میراگر جرمی فعال برای کاهش پاسخ سازه می‌پردازد. یکی از کاستی‌های سیستم‌های فازی نوع ۱، ناتوانی آن‌ها در لحاظ کردن عدم قطعیت در اطلاعات تشکیل دهنده‌ی پایگاه قوانین فازی است. سیستم‌های فازی نوع ۲، قادر به برطرف کردن این کاستی است و عدم قطعیت در رفتار سازه و بارگذاری را لحاظ می‌کنند. برای بررسی کارایی روش کنترلی پیشنهادی، از یک سازه‌ی ۱۱ طبقه‌ی برشی استفاده شده و این سازه تحت اثر شتاب پایه‌ی مربوط به ۴ زلزله‌ی میدان دور و نزدیک قرار گرفته است. نتایج روش کنترلی پیشنهادی با نتایج سازه‌ی کنترل شده با میراگر جرمی غیرفعال و سازه‌ی کنترل شده با میراگر جرمی فعال با کنترل کننده‌ی فازی نوع ۱ مقایسه شده و نتایج نشان داده است که کنترل کننده‌ی پیشنهادی، کمی بیشتر به ازاء نیروهای کنترلی نسبت به کنترل کننده‌ی فازی نوع ۱، باعث کاهش پاسخ بیشتر در سازه می‌شود.

واژگان کلیدی: میراگر جرمی تنظیم شده‌ی فعال، کنترل کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ بازرسی، کنترل کننده‌ی منطق فازی نوع ۱، تحریک زلزله، کاهش پاسخ.

shariatmadar@um.ac.ir
golnargesi.siamak@gmail.com

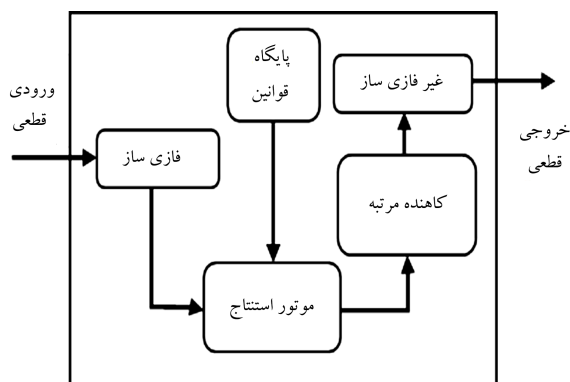
۱. مقدمه

سازه‌های مهندسی عمران در طول عمر خود می‌توانند تحت اثر تحریکات مختلفی از قبیل نیروی زلزله و باد قرار گیرند. اگر شدت بارهای وارده و نیز ارتفاع سازه افزایش یابد، دیگر سختی و میرایی سیستم‌های مقاوم، قابلیت تحمل بارهای جانبی وارده را ندارد. بنابراین استفاده از روش‌های کنترل سازه برای کاهش پاسخ‌ها و خسارت وارد بر سازه الزامی است. روش‌های کنترل سازه به دو دسته‌ی کلی فعال و غیرفعال تقسیم بندی می‌شوند. علی‌رغم اینکه روش‌های کنترل غیرفعال به سبب کاربرد ساده و قابلیت اعتماد بالا بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولی دارای محدودیت‌هایی از قبیل محدود بودن ظرفیت نیروی کنترل و عدم تطبیق پذیری با تحریکات و بارگذاری‌های مختلف هستند. میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) یکی از قدیمی‌ترین و در عین حال، رایج‌ترین ابزارهای کنترل غیرفعال است، که نخستین بار در سال ۱۹۰۹ برای کاهش حرکت متلاطم کشتی‌ها استفاده شده است.^[۱] بعد از پژوهش مذکور، تلاش‌های فراوانی در زمینه‌ی تعیین پارامترهای بهینه‌ی TMD برای کاهش هر چه بیشتر پاسخ سازه‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف انجام پذیرفت.^[۲-۱۲] بیشتر این پژوهش‌ها، ظرفیت محدود TMD در کاهش پاسخ سازه، تحت بعضی از بارگذاری‌های خاص را نشان دادند. با توجه به محدودیت‌های مربوط به سیستم‌های

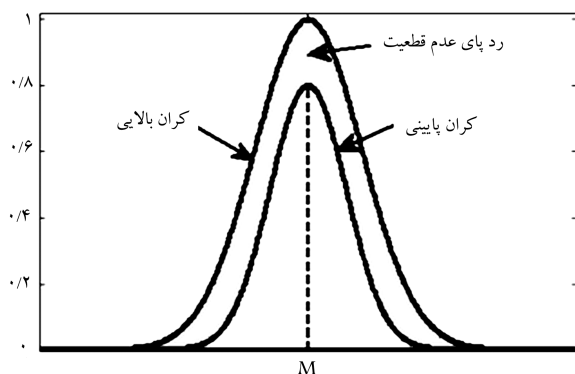
کنترل غیرفعال از جمله TMD، سیستم‌های کنترل فعال در سازه‌ها مطرح شدند. نخستین بار در سال ۱۹۷۲، روابط کنترل مدرن و مفهوم کنترل فعال سازه‌ی در مهندسی عمران مطرح شد.^[۱۳] سیستم‌های کنترل فعال برای اعمال نیروی کنترل به یک منبع خارجی انرژی نیاز دارند. یکی از مزایای این نوع از سیستم‌های کنترلی، ظرفیت بالای آن‌ها در ایجاد نیروی کنترل است. در عین حال، سیستم‌های کنترلی فعال دارای معایبی از قبیل قیمت بالای تجهیزات سیستم کنترل فعال، پدیده‌ی تأخیر زمانی و وابسته بودن به توان خارجی نیز هستند. میراگر جرمی تنظیم شده (ATMD) یکی از ابزارهای کنترل فعال سازه‌ی است که مطالعات وسیعی تاکنون بر روی آن صورت پذیرفته است. بخش گسترده‌ی این مطالعات مربوط به الگوریتم‌های کنترل فعال مورد استفاده در کنترل کننده در ATMD برای ایجاد نیروی کنترل است. در سال‌های اخیر، تلاش‌های فراوانی در ارتباط با الگوریتم‌های کنترل فعال بر پایه‌ی ریاضیات، از قبیل روش کنترل بهینه‌ی LQR،^[۱۴] روش اختصاص قطب،^[۱۵] و روش بنگ - بنگ،^[۱۶] برای کاهش ارتعاشات سازه‌ها صورت پذیرفته است. ولی با وجود این، کاربرد سیستم‌های کنترلی هوشمند نظیر فازی در سال‌های اخیر، بسیار مورد توجه بوده و کماکان رو به گسترش است. علت این امر، ویژگی‌های منحصر به فرد کنترل کننده‌ی فازی از قبیل: عدم نیاز به مدل ریاضی برای طرح سیستم کنترلی، استفاده از تجربه‌ی انسانی برای اعمال نیروی کنترل و قابلیت درک بهتر رفتار غیرخطی سازه در تغییر شکل‌های بزرگ است. یکی از نخستین موارد استفاده از

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۹/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۲/۶/۲۴، پذیرش ۱۳۹۲/۷/۱.



شکل ۱. ساختار سیستم فازی نوع ۲ بازه‌یی.



شکل ۲. توابع عضویت نوع ۲ بازه‌یی.

نوشتار، برای بررسی مؤثر بودن روش کنترلی پیشنهادی، از یک مثال عددی استفاده شده است. در این مثال، یک سازه‌ی ۱۱ طبقه‌ی برشی واقع در شهر رشت در ایران،^[۲۳] مورد مطالعه قرار گرفته و از یک کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ برای تولید نیروی کنترل در ATMD، که در تراز بام قرار دارد، استفاده شده است. سازه‌ی مذکور تحت اثر تحریک ۲ زلزله‌ی میدان دور (السنتر و هاجینوهه) و ۲ زلزله‌ی میدان نزدیک (کوبه و نورث ریج) قرار گرفت. نتایج به دست آمده از سازه‌ی کنترل شده با ATMD با کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲، با نتایج حاصل از سازه‌ی کنترل شده با ATMD با کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۱ و سازه‌ی کنترل شده با TMD مقایسه شده و کارایی و مؤثر بودن استفاده از کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی در کاهش هر چه بیشتر پاسخ سازه، به اثبات رسیده است.

۲. مدل سازه‌یی

یک سازه‌ی n طبقه‌ی برشی را، که یک میراگر جرمی فعال در تراز بام آن قرار دارد، می‌توان به صورت یک سیستم $(n + 1)$ درجه‌ی آزادی در نظر گرفت. معادله‌ی حرکت مربوط به این سیستم را که تحت اثر شتاب پایه‌ی a_g قرار دارد، می‌توان با معادله‌ی ۱ بیان کرد:

$$M.\ddot{U}(t) + C.\dot{U}(t) + K.U(t) = -M.E.a_g + E_f.F \quad (1)$$

که در آن، M ، C و K به ترتیب بیانگر ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سیستم هستند. $U(t)$ بردار تغییرمکان افقی درجات آزادی نسبت به زمین است. E بردار تأثیری است که بیانگر تغییرمکان هر درجه‌ی آزادی به ازاء تغییرمکان واحد زمین

کنترل‌کننده‌ی منطق فازی برای ایجاد نیروی کنترل در ATMD، پژوهشی است که در سال ۱۹۹۸ انجام شده است.^[۱۷] در این پژوهش از یک سازه‌ی معیار ۳ طبقه به همراه ATMD با کنترل‌کننده‌ی منطق فازی استفاده شده و این سازه تحت شتاب پایه‌ی زلزله قرار گرفته است و در آن معیارهای عملکردی سیستم کنترلی از قبیل: توانایی آن در کاهش RMS شتاب طبقه‌ی بام، کاهش تغییرمکان طبقه‌ی بام و غیره (معیارهای J_1 تا J_7) بررسی شده است. بعد از آن در چند پژوهش مختلف از دو سازه‌ی معیار ۵ و ۷ طبقه استفاده شده و این سازه‌ها تحت زلزله‌های مختلف، باد طولی و باد عرضی قرار گرفته‌اند و برای کنترل سازه از ATMD با کنترل‌کننده‌ی منطق فازی استفاده شده است.^[۱۸-۲۱] کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی آن‌ها با کنترل‌کننده‌های LQR و LQG مقایسه شد و نتایج نشان داد که کنترل‌کننده‌ی منطق فازی، عملکرد بهتری نسبت به کنترل‌کننده‌های یادشده دارد. در پژوهشی در سال ۲۰۰۴ نیز از سازه‌ی معیار ۷۶ طبقه استفاده شد و ATMD با کنترل‌کننده‌ی منطق فازی با خواص بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک بر روی آن قرار داده شد، و شاخص‌های شتاب و تغییرمکان کمیته شدند.^[۲۲] نمونه‌ی دیگری از کاربرد الگوریتم ژنتیک در کنترل‌کننده‌ی منطق فازی، در سال ۲۰۰۷ انجام و ATMD با کنترل‌کننده‌ی منطق فازی بر روی یک سازه‌ی برشی ۱۱ طبقه قرار داده شد و از الگوریتم ژنتیک برای تنظیم ضرایب وزنی پایگاه قواعد فازی و تعیین مشخصات بهینه‌ی میراگر جرمی استفاده شد.^[۲۳] و همچنین سازه‌ی مذکور تحت ۴ زلزله‌ی السنتر، کوبه، هاجینوهه، و نورث ریج قرار داده شد و پاسخ سازه با پاسخ‌های حاصل از سازه‌ی کنترل شده با TMD و سازه‌ی کنترل شده با ATMD با کنترل‌کننده‌ی LQR مقایسه و نشان داده شد که کنترل‌کننده‌ی فازی - ژنتیک، عملکرد بهتری در کاهش پاسخ سازه نسبت به روش کنترل بهینه‌ی LQR دارد. همچنین، الگوریتم فازی به همراه الگوریتم کنترلی لغزشی نیز به کار رفته است. در پژوهش دیگری نیز از کنترل‌کننده‌ی فازی لغزشی برای ایجاد نیروی کنترل در ATMD استفاده و نشان داده شد که کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی، در کاهش پاسخ سازه مؤثر است.^[۲۴] در یکی از آخرین پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی کاربرد کنترل‌کننده‌ی منطق فازی برای ایجاد نیروی کنترل در ATMD، ATMD با کنترل‌کننده‌ی منطق فازی روی یک سازه‌ی برشی ۱۵ طبقه قرار داده شد. نتایج به دست آمده، بیانگر کارایی خوب کنترل‌کننده‌ی منطق فازی، تحت بارها و زلزله‌های مختلف بود.^[۲۵] با بررسی سیستم‌های فازی به کار گرفته شده در پژوهش‌های پیشین (سیستم‌های فازی نوع ۱)، می‌توان دریافت که اطلاعات موجود، که برای ایجاد قوانین سیستم‌های فازی به کار می‌روند، خود می‌توانند عدم قطعیت داشته باشند؛ که این عدم قطعیت در سیستم‌های فازی نوع ۱ لحاظ نمی‌شود. برای رفع این کاستی، سیستم‌های فازی نوع ۲، برای نخستین بار در سال ۱۹۷۵ پیشنهاد شد.^[۲۶] ساختار مربوط به این نوع از سیستم‌ها را می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد. این سیستم‌ها قابلیت در نظر گرفتن عدم قطعیت قوانین موجود در سیستم‌های فازی را دارد.^[۲۷، ۲۸] در واقع، نوع تکامل یافته‌ی از مجموعه‌های فازی نوع ۱ هستند (شکل ۲). مفاهیم پایه‌ی مربوط به سیستم‌ها و مجموعه‌های فازی نوع ۲ به تدریج بهبود یافتند.^[۲۸-۳۲] و پیشرفت‌های مهمی در زمینه‌ی مجموعه‌ها و سیستم‌های فازی نوع ۲ بازه‌یی ارائه شد.^[۳۳] با وجود استفاده از سیستم‌های فازی نوع ۲ در طرح کنترل‌کننده‌های فازی در گرایش‌های مختلف مهندسی و کسب نتایج مطلوب،^[۳۴-۳۶] کاربرد آن در زمینه‌ی کنترل فعال سازه‌ها به وسیله‌ی ATMD، به عنوان یک گرایش نو در مهندسی عمران تلقی شده و تاکنون هیچ‌گونه گزارشی، مبنی بر استفاده از آن در ایجاد نیروی کنترل در ATMD ارائه نشده است. این مطالعه، به بحث در ارتباط با کاربرد کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ بازه‌یی برای ایجاد نیروی کنترل فعال در ATMD در جهت رسیدن به پیشینه‌ی کاهش پاسخ سازه‌ی پرداخته است. در این

به گونه‌یی که $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ، $z = 1, 2, \dots, M$ و y به ترتیب ورودی و خروجی سیستم منطق فازی نوع ۲ هستند.

۳.۳. موتور استنتاج

در سیستم‌های فازی نوع ۲ بازه‌یی، موتور استنتاج، نقش ترکیب قوانین را بر عهده دارد و نگاشتی از سیستم‌های فازی نوع ۲ بازه‌یی ورودی به خروجی ارائه می‌کند. با به‌کارگیری ورودی‌ها و عملگرهای بخش مقدم، مجموعه‌ی فازی آتش‌شده (مجموعه‌ی خروجی موتور استنتاج) به صورت رابطه‌ی ۱۹ به دست می‌آید:

$$F^j(X) = \prod_{i=1}^n \mu_{\bar{F}^j_{ij}}(x_j) \quad (19)$$

که در این رابطه، $t - \text{نرم}$ ، به صورت حاصل ضرب فرض می‌شود. همچنین چون در این نوشتار به بحث در ارتباط با سیستم‌های فازی نوع ۲ پرداخته شده است، با توجه به رابطه‌ی ۲۰، مجموعه‌های ورودی آتش‌شده بر اساس توابع عضویت بالایی و پایینی تعریف می‌شوند:

$$F^j(X) = (\underline{f}^j(X), \bar{f}^j(X)) \quad (20)$$

به گونه‌یی که $\underline{f}^j(X)$ و $\bar{f}^j(X)$ با توجه به روابط ۲۱ و ۲۲، به ترتیب برابر با توابع عضویت بالایی و پایینی بوده و علامت *، بیانگر $t - \text{نرم}$ است:

$$\underline{f}^j(X) = \underline{\mu}_{\bar{F}^j_{1j}} * \underline{\mu}_{\bar{F}^j_{2j}} * \dots * \underline{\mu}_{\bar{F}^j_{nj}} \quad (21)$$

$$\bar{f}^j(X) = \bar{\mu}_{\bar{F}^j_{1j}} * \bar{\mu}_{\bar{F}^j_{2j}} * \dots * \bar{\mu}_{\bar{F}^j_{nj}} \quad (22)$$

۴.۳. کاهنده‌ی مرتبه و غیر فزاد ساز

چون خروجی موتور استنتاج، یک مجموعه‌ی فازی نوع ۲ است، نیاز به یک کاهنده‌ی مرتبه است تا مجموعه فازی نوع ۲ را به مجموعه‌ی فازی نوع ۱ تبدیل کند و سپس عملیات غیر فزاد سازی بر روی آن انجام شود. کاهنده‌ی مرتبه، نخستین بار در پژوهش‌هایی در سال‌های ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹ ارائه شده است. [۲۷]، [۳۱] که در یکی از آنها، [۳۱] به ۵ روش مختلف کاهش مرتبه اشاره شده است. در بین این روش‌ها، روش مرکز مجموعه‌ها (cos)، به سبب محاسبه‌ی بسیار ساده و کمک الگوریتم تکراری کارنیک و مندل، [۲۷] بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. کاهنده‌ی مرتبه‌ی مرکز مجموعه‌ها (cos) را می‌توان به صورت معادله‌ی ۲۳ نشان داد که در سیستم‌های فازی نوع ۲ بازه‌یی، Y_{\cos} یک مجموعه‌ی فازی نوع ۲ بازه‌یی است که توسط نقاط انتهایی چپ (y_l) و انتهایی راست (y_r) آن تعیین می‌شود:

$$Y_{\cos}[y_l, y_r] = \int_{\theta^1} \dots \int_{\theta^M} \int_{f^1} \dots \int_{f^M} \left(\frac{1}{\left(\frac{\sum_{j=1}^M f^j \cdot \theta_j}{\sum_{j=1}^M f^j} \right)} \right) \quad (23)$$

به گونه‌یی که $f_j \in F_j = (\underline{f}_j(X), \bar{f}_j(X))$ و θ^j ، مرکز مجموعه‌ی تالی نام است. در حالت کلی، هیچ‌گونه رابطه‌ی دقیقی برای محاسبه‌ی y_l و y_r وجود ندارد. با وجود این، کارنیک و مندل، دو نوع الگوریتم برای محاسبه‌ی دو نقطه‌ی انتهایی ارائه داده‌اند، [۳۲] که به الگوریتم‌های تکراری KM معروف است. در صورت استفاده از فزاد ساز منفرد، موتور استنتاج حاصل ضرب و

$$y_l = \left(\frac{\sum_{j=1}^M f^j_i \cdot \theta^j_i}{\sum_{j=1}^M f^j_i} \right) \quad (24)$$

$$y_r = \left(\frac{\sum_{j=1}^M f^j_r \cdot \theta^j_r}{\sum_{j=1}^M f^j_r} \right) \quad (25)$$

به گونه‌یی که θ^j_l و θ^j_r ، به ترتیب مربوط به نقطه‌ی انتهایی چپ و انتهایی راست مجموعه‌ی تالی نام است. در انتها می‌توان با میانگین‌گیری از y_l و y_r ، مجموعه‌ی به‌دست‌آمده از کاهنده‌ی مرتبه را مطابق رابطه‌ی ۲۶ غیر فزاد کرد:

$$y = \left[\frac{y_l + y_r}{2} \right] \quad (26)$$

۴. طراحی کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ بازه‌یی

کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ بازه‌یی، بر اساس داده‌های قطعی که مستقیماً از سازه دریافت می‌شود، طراحی می‌شود. این داده‌ها طی فرایند فزاد سازی، بر روی مجموعه‌های فزاد نگاشت می‌شوند. در این پژوهش، کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ بازه‌یی، با استفاده از دو متغیر ورودی تغییر مکان و سرعت بام سازه، هر یک دارای ۳ تابع عضویت مثلثی بالایی و ۳ تابع عضویت مثلثی پایینی و یک متغیر خروجی مربوط به نیروی کنترل فعال با ۷ تابع عضویت مثلثی بالایی و ۷ تابع عضویت مثلثی پایینی طراحی شده است. توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی که در بازه‌ی معمول (۱ و -۱) تعریف شده‌اند، به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ قابل مشاهده و با حروف مخفف ارائه‌شده در جدول ۱ نام‌گذاری شده‌اند. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، H_i ، L_i و $(i = N, Z, P)$ ، بیانگر پارامترهای توابع عضویت پایینی در متغیرهای ورودی، و H_m و m ، بیانگر پارامترهای توابع عضویت پایینی در متغیر خروجی هستند. روابط ۲۷ تا ۲۹، بیانگر توابع عضویت بالایی و پایینی متغیرهای ورودی و روابط ۳۰ تا ۳۱، بیانگر توابع عضویت بالایی و پایینی متغیرهای خروجی هستند.

جدول ۱. متغیرهای فزاد.

| تعریف | متغیر | تابع عضویت |
|-----------------|-------|------------|
| Positive | P | |
| Zero | Z | ورودی |
| Negative | N | |
| Positive Big | PB | |
| Positive Medium | PM | |
| Positive Small | PS | |
| Zero | Z | خروجی |
| Negative Small | NS | |
| Negative Medium | NM | |
| Negative Big | NB | |

$$C = \{-0.75, -0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5, 0.75\} \quad (30)$$

$$\mu(X_i) = \begin{cases} H_m \cdot \left\{ 1 - \left| \frac{X_i - C}{0.25 - m} \right| \right\} & (C - c_1) < X_i < (C + c_1) \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

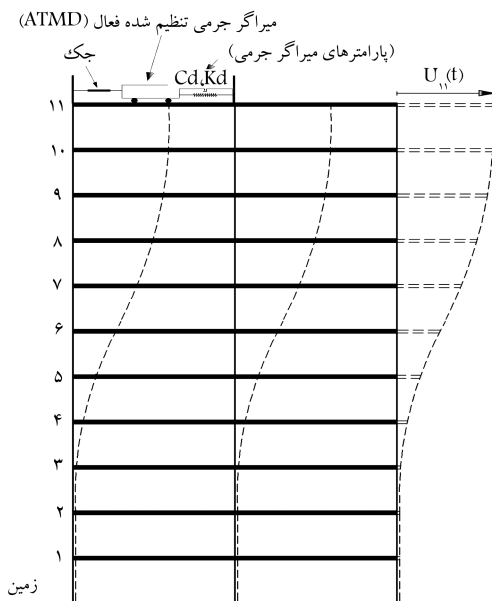
$$C = \{-0.75, -0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5, 0.75\}, \quad (31)$$

$$c_1 = (0.25 - m)$$

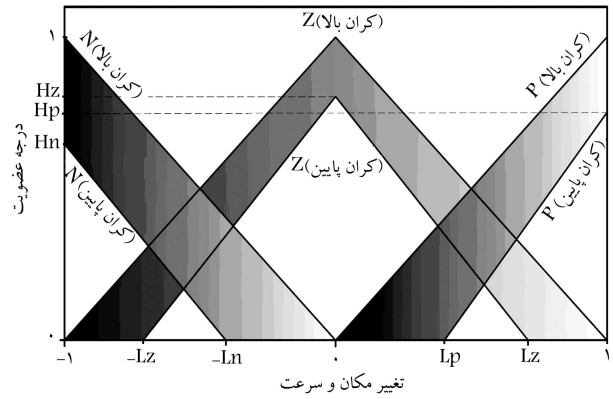
۵. مدل سازی و نتایج

جهت بررسی کارایی روش کنترلی پیشنهادی در کاهش پاسخ سازه‌ها تحت بار زلزله از یک سازه‌ی ۱۱ طبقه‌ی برشی با مشخصات ارائه شده در جدول ۲، به همراه یک ATMD در تراز بام استفاده شده است (شکل ۵).

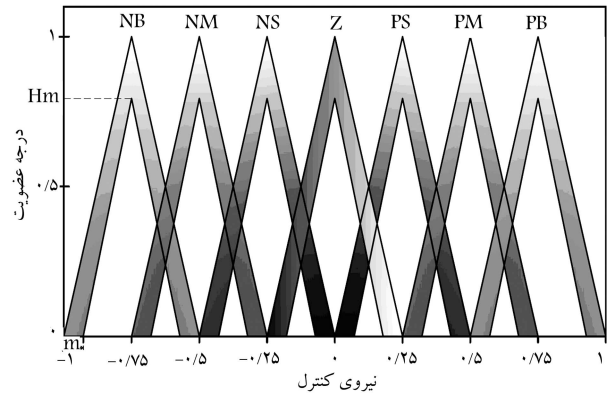
همچنین، میرایی سیستم از روش رایلی و با در نظر گرفتن دو مود اول محاسبه شده است. پارامترهای نسبت جرم، نسبت میرایی و نسبت بسامدی ATMD به ترتیب دارای مقادیر ۰٫۰۳، ۰٫۰۷ و ۱ هستند. در این پژوهش برای ایجاد نیروی کنترل در ATMD از کنترل کننده‌ی منطق فازی نوع ۱ و ۲ استفاده شده و نیروی کنترل، از طریق جک به سازه اعمال شده است. برای بررسی میزان تأثیر سیستم کنترلی پیشنهادی در بارگذاری‌های مختلف، از ۴ شتاب‌نگاشت السنترو ۲، هاجینوهه ۳، نورتریج ۴ و کوبه ۵ برای تحریک سازه استفاده شده است. بیشینه‌ی شتاب مطلق این شتاب‌نگاشت‌ها به ترتیب g ۰٫۳۴۱۷، g ۰٫۲۲۵، g ۰٫۸۲۶۷ و g ۰٫۸۱۷۸ هستند. در این پژوهش به بحث در ارتباط با هر دو نوع پاسخ تغییر مکان و شتاب سازه در سیستم‌های کنترلی مختلف پرداخته شده است. علت این امر، وابستگی معیارهای مقاومت و سرویس‌پذیری به تغییر مکان و شتاب سازه است، که اهمیت بسیار بالایی دارد. نتایج مربوط به بیشینه‌ی تغییر مکان طبقات سازه‌ی ۱۱ طبقه در حالات کنترل نشده، کنترل شده با TMD، کنترل شده با کنترل کننده‌ی منطق فازی نوع ۱ و کنترل شده با کنترل کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ بازه‌ی، در زلزله‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند (شکل ۶).



شکل ۵. مدلی از سیستم سازه‌ی همراه با ATMD.



شکل ۳. توابع عضویت مربوط به متغیرهای ورودی (تغییر مکان و سرعت).



شکل ۴. توابع عضویت مربوط به متغیر خروجی (نیروی کنترل).

$$\bar{\mu}(Z) = \begin{cases} (1 - |x|) & -1 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (27)$$

$$\underline{\mu}(Z) = \begin{cases} H_Z \cdot \left(1 - \left| \frac{x}{L_Z} \right| \right) & -L_Z \leq x \leq L_Z \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

$$\bar{\mu}(P) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ x & 0 \leq x \leq 1 \\ 1 & x > 1 \end{cases} \quad (28)$$

$$\underline{\mu}(P) = \begin{cases} 0 & x < L_P \\ H_P \cdot \left(1 + \left(\frac{x-1}{1-L_P} \right) \right) & L_P \leq x \leq 1 \\ H_P & x > 1 \end{cases}$$

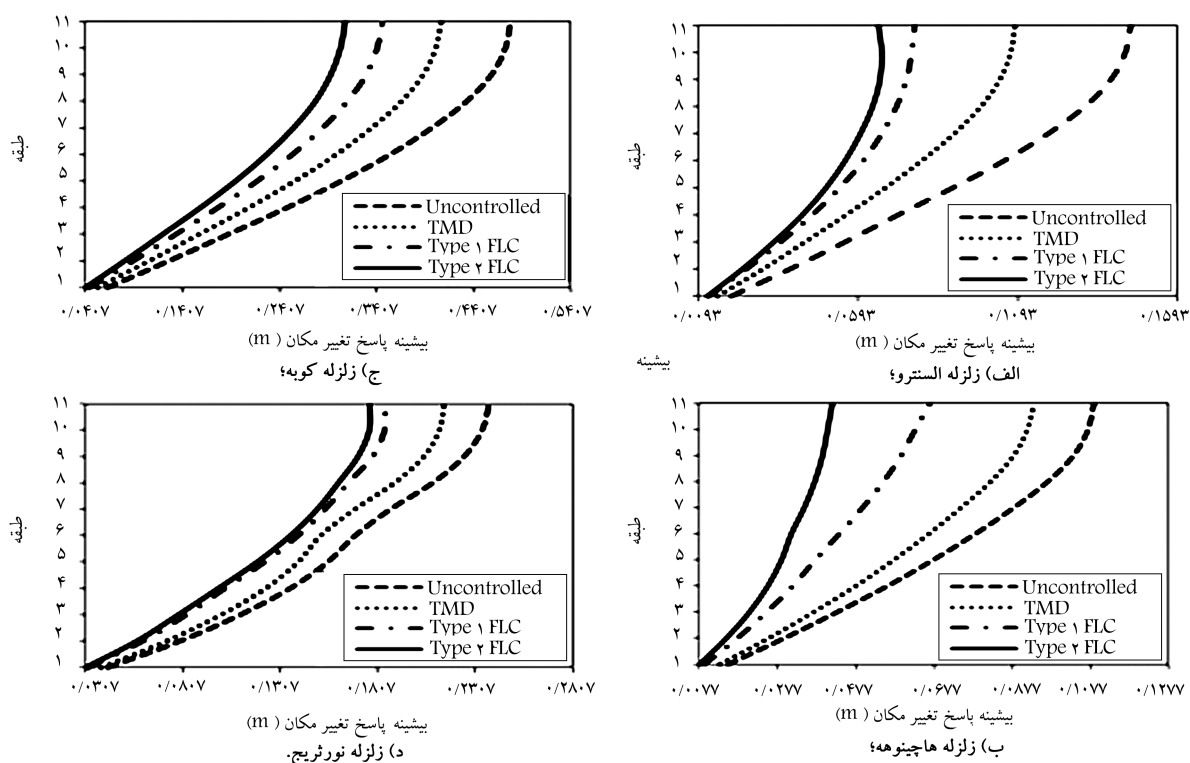
$$\bar{\mu}(N) = \begin{cases} 0 & x < -1 \\ -x & -1 \leq x \leq 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases} \quad (29)$$

$$\underline{\mu}(N) = \begin{cases} H_n & x < -1 \\ H_n \cdot \left(1 - \left(\frac{x+1}{1-L_n} \right) \right) & -1 \leq x \leq -L_n \\ 0 & x > -L_n \end{cases}$$

$$\bar{\mu}(X_i) = \begin{cases} 1 - \left| \frac{X_i - C}{0.25} \right| & (C - 0.25) < X_i < (C + 0.25) \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

جدول ۲. پارامترهای سازه‌ی برشی ۱۱ طبقه.

| طبقه | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| جرم (Kg) | ۲۱۵۳۷۰ | ۲۰۱۷۵۰ | ۲۰۱۷۵۰ | ۲۰۰۹۳۰ | ۲۰۰۹۳۰ | ۲۰۰۹۳۰ | ۲۰۳۱۸۰ | ۲۰۲۹۱۰ | ۲۰۲۹۱۰ | ۱۷۶۱۰۰ | ۶۶۲۳۰ |
| سختی (N/M) | $۴,۶۸e^8$ | $۴,۷۶e^8$ | $۴,۶۸e^8$ | $۴,۵۰e^8$ | $۴,۵۰e^8$ | $۴,۵۰e^8$ | $۴,۵۰e^8$ | $۴,۳۷e^8$ | $۴,۳۷e^8$ | $۴,۳۷e^8$ | $۳,۱۲e^8$ |



شکل ۶. بیشینه‌ی تغییر مکان طبقات در حالات مختلف کنترلی.

مشابه هستند. یعنی به ازاء بخش مقدم یکسان (IF-Part) در یک قانون، بخش تالی (THEN-Part) متفاوت وجود خواهد داشت. به عنوان مثال، به ازاء توابع عضویت یکسان برای تغییر مکان و سرعت سازه، افراد خبره‌ی مختلف با توجه به دیدگاه‌های متفاوتی که در ارتباط با رفتار سازه‌ی دارند، توابع عضویت متفاوتی (تفاوت در تعداد، نوع و میزان بازشدگی یا انحراف معیار) را برای اعمال نیروی کنترل پیشنهاد می‌کنند. این امر نیز باعث ایجاد عدم قطعیت در قوانین فازی می‌شود، که فقط سیستم‌های فازی نوع ۲، قادر به در نظر گرفتن این نوع از عدم قطعیت‌ها هستند. عدم قطعیت، توسط عوامل دیگری نظیر تحریک زلزله نیز می‌تواند ایجاد شود. به عبارت دیگر، متغیرهای اندازه‌گیری شده نظیر تغییر مکان و سرعت سازه، که به عنوان ورودی سیستم فازی باعث فعال شدن آن می‌شوند، می‌توانند تحت اثر تحریک زلزله، مختل (نویزی) شوند. همچنین ممکن است حس‌گرهایی که برای اندازه‌گیری تغییر مکان و سرعت سازه تعبیه شده‌اند، در اندازه‌گیری پاسخ، دارای خطا باشند و تحت اثر تحریک‌های آبی زلزله در یک بازه‌ی زمانی خاص دچار اختلال شوند. سیستم‌های فازی نوع ۲ با در نظر گرفتن این نوع از عدم قطعیت‌ها باعث کاهش هر چه بیشتر پاسخ سازه‌ها در زلزله‌های مختلف می‌شوند. با توجه به جدول ۳، بیشینه‌ی کاهش پاسخ تغییر مکان طبقه‌ی بام (بر حسب درصد) تحت اثر زلزله‌های هاچینوهه و کوبه، در حالت استفاده از کنترل‌کننده‌ی منطقی فازی نوع ۱ به ترتیب $۳۸,۶\%$ و $۲۲,۵\%$ و در حالت استفاده از کنترل‌کننده‌ی منطقی فازی نوع ۲ بازه‌ی، $۶۱,۶\%$ و $۲۵,۸\%$ است. با مقایسه‌ی این مقادیر و نیز مقادیر مربوط به کاهش

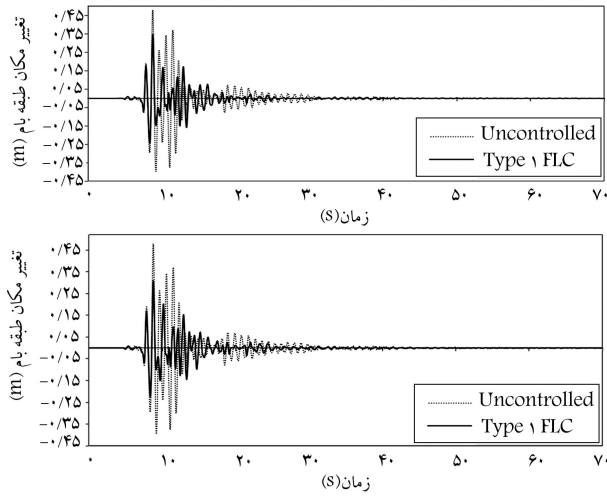
نتایج تغییر مکان به همراه نتایج مربوط به شتاب طبقات و درصد کاهش پاسخ‌ها در حالات مختلف کنترلی، در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. به سبب تشابه نتایج مربوط به زلزله‌های میدان دور با یکدیگر و نیز زلزله‌های میدان نزدیک با یکدیگر، در ادامه‌ی نوشتار، فقط نمودارهای مربوط به بیشینه‌ی شتاب مطلق طبقات، تاریخچه‌ی پاسخ تغییر مکان و نیز تاریخچه‌ی پاسخ شتاب طبقه‌ی بام در یک زلزله‌ی میدان دور (هاچینوهه) و یک زلزله‌ی میدان نزدیک (کوبه) ارائه شده‌اند (شکل‌های ۷ تا ۱۱). با مقایسه‌ی بیشینه‌ی تغییر مکان و شتاب مطلق طبقات در حالات مختلف کنترلی (شکل‌های ۶ و ۷) می‌توان دریافت که سازه‌ی کنترل‌شده با کنترل‌کننده‌ی منطقی فازی نوع ۲ دارای تغییر مکان و شتاب کمتری در مقایسه با سازه‌ی کنترل‌شده با کنترل‌کننده‌ی منطقی فازی نوع ۱ و TMD در زلزله‌های مختلف است. یکی از علل تأثیر زیاد کنترل‌کننده‌ی منطقی فازی نوع ۲ در کاهش پاسخ سازه را می‌توان در منظور کردن عدم قطعیت‌ها در قوانین فازی دانست، که این مسئله در سیستم‌های فازی نوع ۱ منظور نمی‌شود. عوامل مختلفی در ایجاد عدم قطعیت در قوانین فازی نقش دارند. به عنوان مثال، اگر از افراد خبره‌ی مختلف، سوآلی در ارتباط با نحوه‌ی انتخاب پارامترهای توابع عضویت متغیرهای ورودی (تغییر مکان و سرعت) و متغیر خروجی (نیروی کنترل) پرسیده شود، پاسخ این افراد با یکدیگر متفاوت خواهد بود. این امر نشانگر عدم قطعیت مجموعه‌های فازی متغیرهای ورودی و خروجی است که فقط در سیستم‌های فازی نوع ۲ در نظر گرفته می‌شود. همچنین افراد خبره‌ی مختلف، دارای جواب‌های متفاوت به یک سؤال، در ارتباط با یک قانون

جدول ۳. بیشینه‌ی پاسخ تغییر مکان و بیشینه‌ی کاهش پاسخ طبقات در حالات مختلف کنترلی.

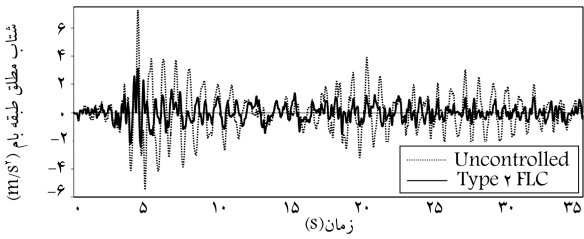
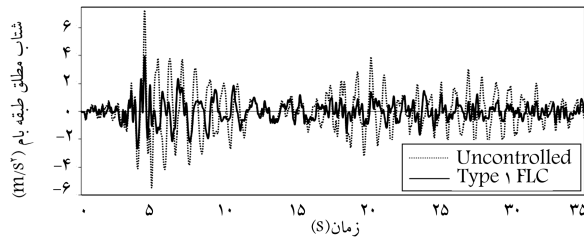
| درصد کاهش پاسخ بیشینه (%) | | | بیشینه‌ی پاسخ تغییر مکان (m) | | | کنترل نشده | طبقه |
|---------------------------|----------|------|------------------------------|----------|-------|------------|------|
| Type\FLC | Type\FLC | TMD | Type FLC | Type\FLC | TMD | | |
| زلزله‌ی السنترو | | | | | | | |
| ۳۸٫۵ | ۳۵٫۴ | ۲۲٫۱ | ۰٫۱۲ | ۰٫۱۳ | ۰٫۱۵ | ۰٫۲۰ | ۱ |
| ۳۹٫۳ | ۳۵٫۹ | ۲۲٫۲ | ۰٫۲۳ | ۰٫۲۴ | ۰٫۳۰ | ۰٫۳۸ | ۲ |
| ۴۰٫۴ | ۳۶٫۶ | ۲۲٫۸ | ۰٫۳۳ | ۰٫۳۵ | ۰٫۴۳ | ۰٫۵۵ | ۳ |
| ۴۱٫۸ | ۳۷٫۵ | ۲۲٫۷ | ۰٫۴۲ | ۰٫۴۵ | ۰٫۵۶ | ۰٫۷۲ | ۴ |
| ۴۴٫۷ | ۳۹٫۸ | ۲۳٫۷ | ۰٫۴۹ | ۰٫۵۴ | ۰٫۶۸ | ۰٫۸۹ | ۵ |
| ۴۷٫۴ | ۴۲٫۰ | ۲۴٫۶ | ۰٫۵۵ | ۰٫۶۱ | ۰٫۷۹ | ۰٫۱۰۵ | ۶ |
| ۴۹٫۵ | ۴۳٫۹ | ۲۴٫۷ | ۰٫۶۰ | ۰٫۶۷ | ۰٫۸۹ | ۰٫۱۱۹ | ۷ |
| ۵۱٫۰ | ۴۵٫۳ | ۲۵٫۰ | ۰٫۶۴ | ۰٫۷۱ | ۰٫۹۸ | ۰٫۱۳۰ | ۸ |
| ۵۲٫۳ | ۴۶٫۳ | ۲۵٫۱ | ۰٫۶۶ | ۰٫۷۴ | ۰٫۱۰۴ | ۰٫۱۳۹ | ۹ |
| ۵۳٫۴ | ۴۶٫۸ | ۲۵٫۱ | ۰٫۶۷ | ۰٫۷۶ | ۰٫۱۰۷ | ۰٫۱۴۳ | ۱۰ |
| ۵۴٫۷ | ۴۶٫۸ | ۲۵٫۱ | ۰٫۶۶ | ۰٫۷۷ | ۰٫۱۰۸ | ۰٫۱۴۵ | ۱۱ |
| زلزله‌ی هاجینوهه | | | | | | | |
| ۴۸٫۷ | ۴۰٫۰ | ۱۳٫۳ | ۰٫۰۰۸ | ۰٫۰۰۹ | ۰٫۰۱۳ | ۰٫۰۱۵ | ۱ |
| ۵۰٫۳ | ۴۰٫۸ | ۱۳٫۶ | ۰٫۰۱۵ | ۰٫۰۱۷ | ۰٫۰۲۵ | ۰٫۰۲۹ | ۲ |
| ۵۲٫۲ | ۴۲٫۰ | ۱۴٫۰ | ۰٫۰۲۱ | ۰٫۰۲۵ | ۰٫۰۳۷ | ۰٫۰۴۳ | ۳ |
| ۵۴٫۸ | ۴۳٫۴ | ۱۴٫۵ | ۰٫۰۲۵ | ۰٫۰۳۲ | ۰٫۰۴۸ | ۰٫۰۵۶ | ۴ |
| ۵۷٫۵ | ۴۴٫۷ | ۱۵٫۰ | ۰٫۰۲۹ | ۰٫۰۳۷ | ۰٫۰۵۷ | ۰٫۰۶۸ | ۵ |
| ۶۰٫۲ | ۴۴٫۴ | ۱۵٫۲ | ۰٫۰۳۱ | ۰٫۰۴۴ | ۰٫۰۶۶ | ۰٫۰۷۸ | ۶ |
| ۶۰٫۸ | ۴۳٫۹ | ۱۵٫۳ | ۰٫۰۳۵ | ۰٫۰۴۹ | ۰٫۰۷۵ | ۰٫۰۸۸ | ۷ |
| ۶۱٫۶ | ۴۳٫۲ | ۱۵٫۱ | ۰٫۰۳۷ | ۰٫۰۵۵ | ۰٫۰۸۲ | ۰٫۰۹۷ | ۸ |
| ۶۲٫۱ | ۴۲٫۶ | ۱۴٫۸ | ۰٫۰۳۹ | ۰٫۰۵۹ | ۰٫۰۸۸ | ۰٫۱۰۳ | ۹ |
| ۶۲٫۲ | ۴۱٫۳ | ۱۴٫۵ | ۰٫۰۴۱ | ۰٫۰۶۳ | ۰٫۰۹۲ | ۰٫۱۰۷ | ۱۰ |
| ۶۱٫۶ | ۳۸٫۶ | ۱۴٫۱ | ۰٫۰۴۲ | ۰٫۰۶۷ | ۰٫۰۹۳ | ۰٫۱۰۹ | ۱۱ |
| زلزله‌ی کوبه | | | | | | | |
| ۳۵٫۹ | ۲۹٫۰ | ۱۶٫۱ | ۰٫۰۴۱ | ۰٫۰۴۵ | ۰٫۰۵۳ | ۰٫۰۶۴ | ۱ |
| ۳۵٫۹ | ۲۸٫۹ | ۱۶٫۰ | ۰٫۰۸۱ | ۰٫۰۹۰ | ۰٫۱۰۶ | ۰٫۱۲۷ | ۲ |
| ۳۶٫۰ | ۲۸٫۸ | ۱۶٫۰ | ۰٫۱۲۰ | ۰٫۱۳۴ | ۰٫۱۵۸ | ۰٫۱۸۸ | ۳ |
| ۳۵٫۹ | ۲۸٫۶ | ۱۵٫۸ | ۰٫۱۵۹ | ۰٫۱۷۷ | ۰٫۲۰۹ | ۰٫۲۴۸ | ۴ |
| ۳۵٫۸ | ۲۸٫۵ | ۱۵٫۸ | ۰٫۱۹۵ | ۰٫۲۱۸ | ۰٫۲۵۶ | ۰٫۳۰۴ | ۵ |
| ۳۵٫۸ | ۲۸٫۴ | ۱۵٫۷ | ۰٫۲۲۷ | ۰٫۲۵۴ | ۰٫۲۹۹ | ۰٫۳۵۴ | ۶ |
| ۳۵٫۹ | ۲۸٫۳ | ۱۵٫۶ | ۰٫۲۵۵ | ۰٫۲۸۵ | ۰٫۳۳۶ | ۰٫۳۹۸ | ۷ |
| ۳۵٫۹ | ۲۸٫۳ | ۱۵٫۵ | ۰٫۲۷۸ | ۰٫۳۱۱ | ۰٫۳۶۶ | ۰٫۴۳۳ | ۸ |
| ۳۶٫۱ | ۲۸٫۱ | ۱۵٫۳ | ۰٫۲۹۳ | ۰٫۳۳۰ | ۰٫۳۸۹ | ۰٫۴۵۹ | ۹ |
| ۳۵٫۹ | ۲۷٫۹ | ۱۵٫۲ | ۰٫۳۰۴ | ۰٫۳۴۱ | ۰٫۴۰۲ | ۰٫۴۷۳ | ۱۰ |
| ۳۵٫۶ | ۲۷٫۶ | ۱۴٫۹ | ۰٫۳۰۸ | ۰٫۳۴۷ | ۰٫۴۰۷ | ۰٫۴۷۹ | ۱۱ |
| زلزله‌ی نورث ریج | | | | | | | |
| ۲۷٫۱ | ۲۳٫۳ | ۸٫۳ | ۰٫۰۳۱ | ۰٫۰۳۲ | ۰٫۰۳۹ | ۰٫۰۴۲ | ۱ |
| ۲۷٫۹ | ۲۴٫۱ | ۸٫۶ | ۰٫۰۵۷ | ۰٫۰۶۰ | ۰٫۰۷۲ | ۰٫۰۷۹ | ۲ |
| ۲۸٫۹ | ۲۵٫۲ | ۸٫۹ | ۰٫۰۷۸ | ۰٫۰۸۲ | ۰٫۱۰۰ | ۰٫۱۱۰ | ۳ |
| ۲۷٫۲ | ۲۴٫۷ | ۹٫۳ | ۰٫۰۹۹ | ۰٫۱۰۲ | ۰٫۱۲۳ | ۰٫۱۳۶ | ۴ |
| ۲۳٫۴ | ۲۰٫۹ | ۹٫۸ | ۰٫۱۱۹ | ۰٫۱۲۳ | ۰٫۱۴۰ | ۰٫۱۵۵ | ۵ |
| ۱۹٫۶ | ۱۷٫۳ | ۱۰٫۵ | ۰٫۱۳۶ | ۰٫۱۴۰ | ۰٫۱۵۱ | ۰٫۱۶۹ | ۶ |
| ۲۰٫۱ | ۱۷٫۹ | ۹٫۸ | ۰٫۱۵۰ | ۰٫۱۵۴ | ۰٫۱۶۹ | ۰٫۱۸۷ | ۷ |
| ۲۳٫۲ | ۲۰٫۸ | ۹٫۴ | ۰٫۱۶۰ | ۰٫۱۶۶ | ۰٫۱۸۹ | ۰٫۲۰۹ | ۸ |
| ۲۴٫۲ | ۲۰٫۹ | ۹٫۲ | ۰٫۱۷۱ | ۰٫۱۷۸ | ۰٫۲۰۴ | ۰٫۲۲۵ | ۹ |
| ۲۴٫۷ | ۲۱٫۴ | ۹٫۴ | ۰٫۱۷۶ | ۰٫۱۸۴ | ۰٫۲۱۲ | ۰٫۲۳۲ | ۱۰ |
| ۲۵٫۸ | ۲۲٫۵ | ۹٫۷ | ۰٫۱۷۷ | ۰٫۱۸۴ | ۰٫۲۱۵ | ۰٫۲۳۸ | ۱۱ |

جدول ۴. بیشینه‌ی پاسخ شتاب مطلق و بیشینه‌ی کاهش پاسخ طبقات در حالات مختلف کنترلی.

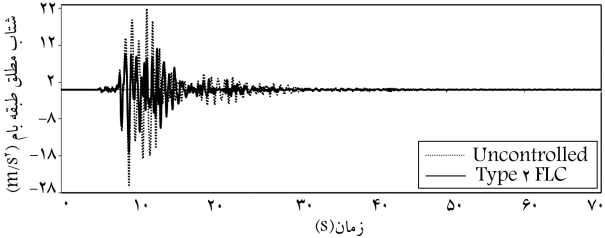
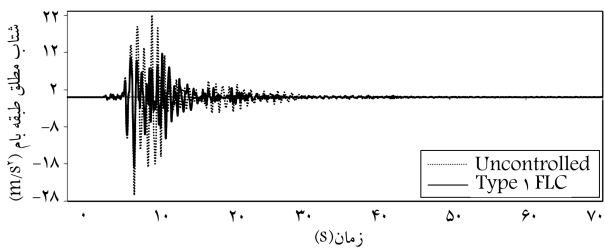
| درصد کاهش پاسخ (%) | | | بیشینه‌ی پاسخ شتاب مطلق (m/s ²) | | | کنترل‌نشده | طبقه |
|--------------------|----------|------|---|----------|--------|------------|------|
| Type\FLC | Type\FLC | TMD | Type\FLC | Type\FLC | TMD | | |
| زلزله‌ی السسترو | | | | | | | |
| ۰٫۴ | ۱٫۷ | ۳٫۳ | ۳٫۱۰۷ | ۳٫۰۶۸ | ۳٫۰۱۷ | ۳٫۱۲۰ | ۱ |
| ۲٫۸ | ۱٫۵ | ۴٫۸ | ۳٫۸۸۷ | ۳٫۹۳۹ | ۳٫۸۰۵ | ۳٫۹۹۹ | ۲ |
| ۹٫۹ | ۸٫۶ | ۱۲٫۰ | ۳٫۹۴۰ | ۳٫۹۹۷ | ۳٫۸۵۰ | ۴٫۳۷۴ | ۳ |
| ۹٫۱ | ۱۴٫۷ | ۱۲٫۸ | ۴٫۲۶۷ | ۴٫۰۰۶ | ۴٫۰۹۳ | ۴٫۶۹۵ | ۴ |
| ۲٫۵ | ۸٫۵ | ۱۳٫۹ | ۴٫۸۰۲ | ۴٫۵۰۵ | ۴٫۲۴۲ | ۴٫۹۲۴ | ۵ |
| ۵٫۷ | ۶٫۷ | ۱۷٫۹ | ۴٫۷۸۶ | ۴٫۷۳۴ | ۴٫۱۶۵ | ۵٫۰۷۶ | ۶ |
| ۱۲٫۰ | ۱۴٫۶ | ۱۷٫۲ | ۵٫۴۲۰ | ۵٫۲۵۶ | ۵٫۰۹۶ | ۶٫۱۵۸ | ۷ |
| ۲۱٫۵ | ۲۵٫۴ | ۱۸٫۳ | ۵٫۷۲۲ | ۵٫۴۳۵ | ۵٫۹۵۴ | ۷٫۲۸۵ | ۸ |
| ۳۰٫۳ | ۲۶٫۹ | ۲۲٫۴ | ۵٫۵۲۶ | ۵٫۷۹۷ | ۶٫۱۵۰ | ۷٫۹۲۸ | ۹ |
| ۳۰٫۴ | ۲۴٫۸ | ۱۹٫۰ | ۵٫۶۷۱ | ۶٫۱۲۳ | ۶٫۵۹۷ | ۸٫۱۴۷ | ۱۰ |
| ۳۷٫۷ | ۳۱٫۱ | ۱۷٫۳ | ۵٫۱۲۳ | ۵٫۶۵۷ | ۶٫۷۹۸ | ۸٫۲۱۶ | ۱۱ |
| زلزله‌ی هاچینوهه | | | | | | | |
| ۲٫۴ | ۶٫۳ | ۰٫۹ | ۲٫۶۴۸ | ۲٫۵۴۲ | ۲٫۶۹۰ | ۲٫۷۱۳ | ۱ |
| ۱۰٫۲ | ۱۳٫۹ | ۲٫۶ | ۳٫۰۰۰ | ۲٫۸۷۸ | ۳٫۲۵۳ | ۳٫۳۴۱ | ۲ |
| ۱۷٫۱ | ۱۸٫۰ | ۴٫۶ | ۳٫۳۴۸ | ۳٫۳۱۳ | ۳٫۸۵۴ | ۴٫۰۴۰ | ۳ |
| ۲۱٫۲ | ۲۰٫۲ | ۶٫۰ | ۳٫۶۲۶ | ۳٫۶۷۶ | ۴٫۳۲۹ | ۴٫۶۰۵ | ۴ |
| ۲۴٫۰ | ۲۱٫۸ | ۶٫۹ | ۳٫۶۸۰ | ۳٫۷۸۵ | ۴٫۵۰۷ | ۴٫۸۴۲ | ۵ |
| ۲۷٫۷ | ۲۵٫۰ | ۸٫۸ | ۳٫۴۱۷ | ۳٫۵۴۴ | ۴٫۳۰۷ | ۴٫۷۲۳ | ۶ |
| ۳۴٫۵ | ۳۱٫۲ | ۱۲٫۰ | ۲٫۸۳۰ | ۲٫۹۷۳ | ۳٫۸۰۰ | ۴٫۳۲۰ | ۷ |
| ۴۸٫۹ | ۴۶٫۸ | ۱۵٫۹ | ۲٫۶۸۸ | ۲٫۷۹۸ | ۴٫۴۲۷ | ۵٫۲۶۲ | ۸ |
| ۵۵٫۰ | ۴۵٫۳ | ۱۴٫۳ | ۲٫۸۶۴ | ۳٫۴۷۸ | ۵٫۴۴۸ | ۶٫۳۶۰ | ۹ |
| ۵۶٫۹ | ۴۴٫۷ | ۱۳٫۶ | ۳٫۰۱۹ | ۳٫۸۷۸ | ۶٫۰۵۶ | ۷٫۰۰۹ | ۱۰ |
| ۵۷٫۰ | ۴۵٫۵ | ۱۳٫۵ | ۳٫۱۲۹ | ۳٫۹۶۰ | ۶٫۲۸۸ | ۷٫۲۷۲ | ۱۱ |
| زلزله‌ی کوبه | | | | | | | |
| ۸٫۵ | ۸٫۱ | ۸٫۸ | ۸٫۴۲۵ | ۸٫۴۶۴ | ۸٫۴۰۲ | ۹٫۲۱۳ | ۱ |
| ۲۶٫۷ | ۲۶٫۰ | ۲۶٫۲ | ۸٫۷۷۵ | ۸٫۸۶۶ | ۸٫۸۴۱ | ۱۱٫۹۷۴ | ۲ |
| ۳۳٫۵ | ۳۲٫۴ | ۳۱٫۷ | ۹٫۱۹۹ | ۹٫۳۴۸ | ۹٫۴۴۸ | ۱۳٫۸۲۵ | ۳ |
| ۳۲٫۱ | ۳۲٫۲ | ۲۹٫۳ | ۱۰٫۰۳۸ | ۱۰٫۰۱۳ | ۱۰٫۴۴۶ | ۱۴٫۷۷۴ | ۴ |
| ۲۲٫۵ | ۲۱٫۴ | ۱۶٫۰ | ۱۱٫۵۰۸ | ۱۱٫۶۷۱ | ۱۲٫۴۷۵ | ۱۴٫۸۵۸ | ۵ |
| ۲۱٫۷ | ۱۹٫۸ | ۱۲٫۳ | ۱۳٫۴۱۷ | ۱۳٫۷۳۴ | ۱۵٫۰۲۱ | ۱۷٫۱۲۹ | ۶ |
| ۲۵٫۹ | ۲۲٫۳ | ۱۲٫۹ | ۱۴٫۶۹۲ | ۱۵٫۴۱۰ | ۱۷٫۲۷۶ | ۱۹٫۸۳۰ | ۷ |
| ۳۲٫۰ | ۲۵٫۰ | ۱۴٫۰ | ۱۵٫۱۰۳ | ۱۶٫۶۷۲ | ۱۹٫۱۰۴ | ۲۲٫۲۱۸ | ۸ |
| ۳۴٫۳ | ۲۶٫۹ | ۱۴٫۹ | ۱۵٫۹۸۸ | ۱۷٫۷۸۹ | ۲۰٫۶۹۴ | ۲۴٫۳۳۱ | ۹ |
| ۳۴٫۸ | ۲۷٫۷ | ۱۵٫۷ | ۱۶٫۷۶۵ | ۱۸٫۵۹۸ | ۲۱٫۶۶۶ | ۲۵٫۷۱۱ | ۱۰ |
| ۳۵٫۵ | ۲۸٫۷ | ۱۵٫۹ | ۱۶٫۹۹۸ | ۱۸٫۷۸۱ | ۲۲٫۱۳۶ | ۲۶٫۳۳۵ | ۱۱ |
| زلزله‌ی نورتریج | | | | | | | |
| ۱۱٫۴ | ۷٫۶ | ۲٫۵ | ۱۰٫۱۴۷ | ۱۰٫۵۹۱ | ۱۱٫۱۷۶ | ۱۱٫۴۵۷ | ۱ |
| ۱۷٫۹ | ۱۲٫۶ | ۴٫۵ | ۱۱٫۳۳۰ | ۱۲٫۰۵۲ | ۱۳٫۱۷۸ | ۱۳٫۷۹۲ | ۲ |
| ۲۱٫۸ | ۱۶٫۴ | ۵٫۹ | ۱۱٫۷۳۶ | ۱۲٫۵۴۵ | ۱۴٫۱۲۳ | ۱۵٫۰۰۷ | ۳ |
| ۲۵٫۴ | ۲۰٫۴ | ۷٫۵ | ۱۱٫۱۸۵ | ۱۱٫۹۳۱ | ۱۳٫۸۶۲ | ۱۴٫۹۸۷ | ۴ |
| ۲۹٫۱ | ۲۴٫۸ | ۹٫۴ | ۹٫۹۴۸ | ۱۰٫۵۵۷ | ۱۲٫۷۱۷ | ۱۴٫۰۳۷ | ۵ |
| ۳۴٫۹ | ۳۱٫۱ | ۱۲٫۲ | ۷٫۸۲۳ | ۸٫۲۸۴ | ۱۰٫۵۵۷ | ۱۲٫۰۲۲ | ۶ |
| ۱٫۴ | ۱٫۴ | ۳٫۸ | ۹٫۸۱۹ | ۹٫۶۱۴ | ۹٫۶۴۳ | ۱۰٫۰۲۷ | ۷ |
| ۱۲٫۶ | ۸٫۶ | ۳٫۹ | ۱۱٫۷۶۶ | ۱۲٫۲۹۳ | ۱۲٫۹۳۲ | ۱۳٫۴۵۶ | ۸ |
| ۱۴٫۷ | ۱۰٫۶ | ۵٫۰ | ۱۳٫۴۳۲ | ۱۴٫۰۸۷ | ۱۴٫۹۶۳ | ۱۵٫۷۵۲ | ۹ |
| ۱۵٫۵ | ۱۲٫۰ | ۵٫۵ | ۱۴٫۳۰۴ | ۱۴٫۸۹۵ | ۱۵٫۹۸۶ | ۱۶٫۹۲۰ | ۱۰ |
| ۱۶٫۷ | ۱۴٫۰ | ۶٫۲ | ۱۴٫۴۲۵ | ۱۴٫۸۹۴ | ۱۶٫۲۴۷ | ۱۷٫۳۱۸ | ۱۱ |



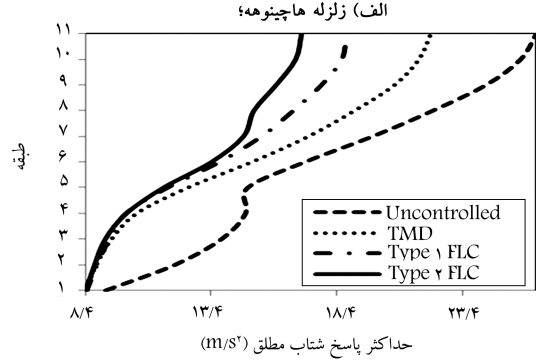
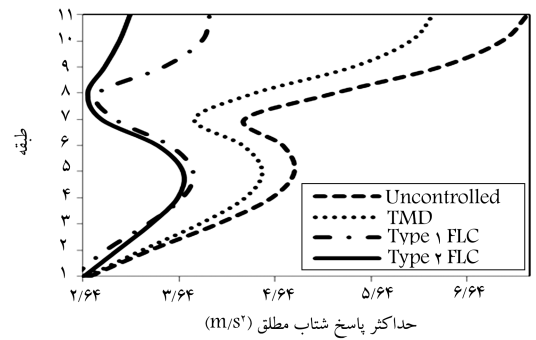
شکل ۹. تاریخچه‌ی زمانی پاسخ تغییر مکان کنترل نشده و کنترل شده‌ی طبقه‌ی بام در زلزله‌ی کوبه.



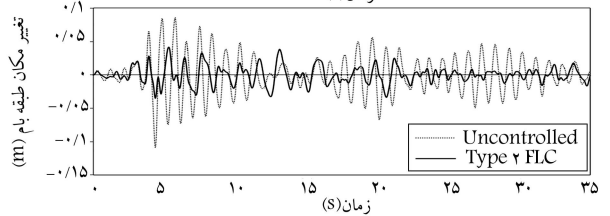
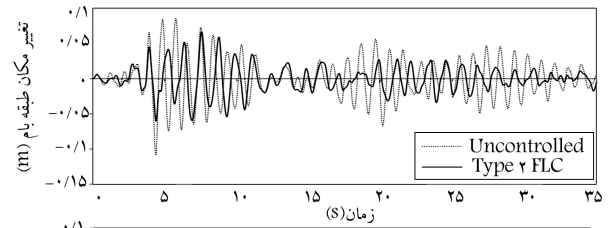
شکل ۱۰. تاریخچه‌ی زمانی پاسخ شتاب مطلق کنترل نشده و کنترل شده‌ی طبقه‌ی بام در زلزله‌ی هاجینوهه.



شکل ۱۱. تاریخچه‌ی زمانی پاسخ شتاب مطلق کنترل نشده و کنترل شده‌ی طبقه‌ی بام در زلزله‌ی کوبه.

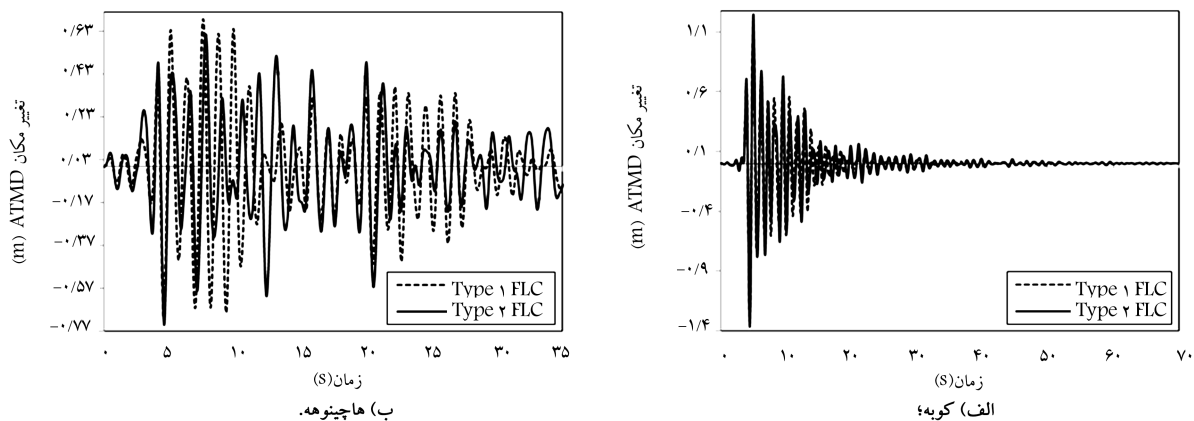


شکل ۷. بیشینه‌ی شتاب مطلق طبقات در حالات مختلف کنترلی.

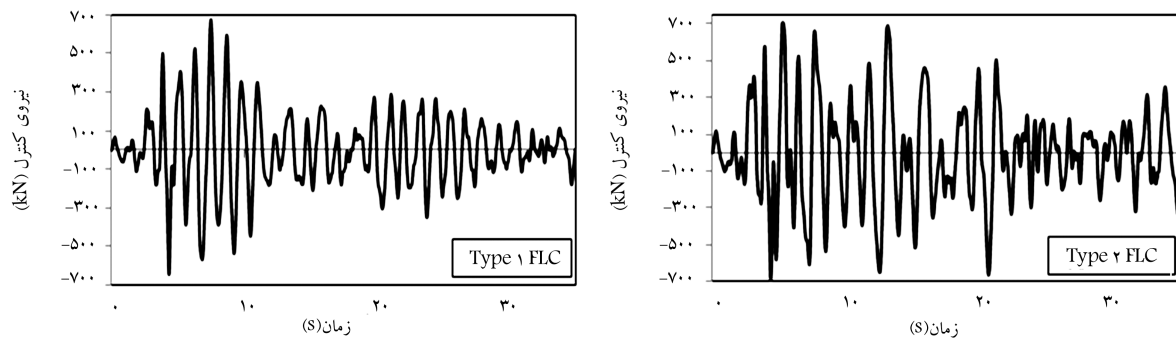


شکل ۸. تاریخچه‌ی زمانی پاسخ تغییر مکان کنترل نشده و کنترل شده‌ی طبقه‌ی بام در زلزله‌ی هاجینوهه.

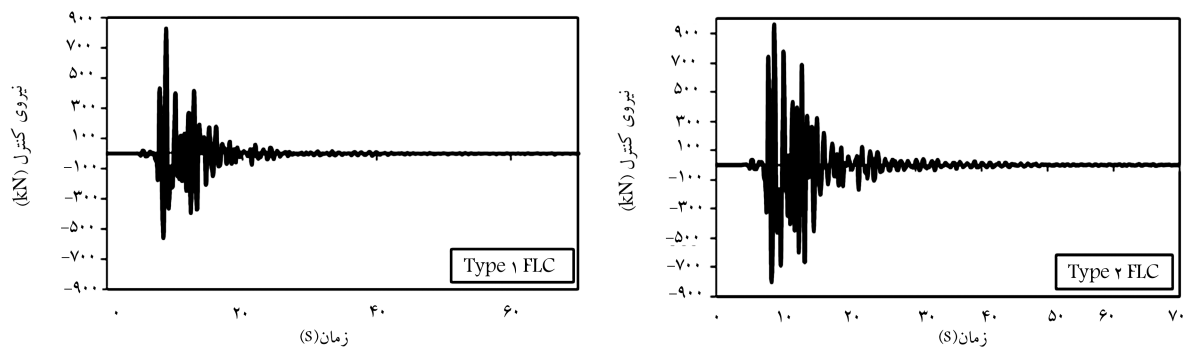
پاسخ بیشینه‌ی سایر طبقات (جدول‌های ۳ و ۴)، می‌توان دریافت که کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ بازه‌ی در کاهش پاسخ بیشینه‌ی طبقات، به ویژه طبقه‌ی بام، نسبت به کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۱ بسیار مؤثر است. این ویژگی کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ بازه‌ی را می‌توان در تاریخچه‌ی زمانی پاسخ نیز مشاهده کرد. در شکل‌های ۸ الی ۱۱، می‌توان تاریخچه‌ی زمانی پاسخ تغییر مکان و شتاب طبقه‌ی بام در حالت استفاده از کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۱ و کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ بازه‌ی، نسبت به حالت کنترل نشده، در زلزله‌های مختلف را مشاهده کرد. با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۸ الی ۱۱ مشاهده می‌شود که اگر چه کنترل‌کننده‌های منطق فازی نوع ۱ و نوع ۲ بازه‌ی، قادر به کاهش تاریخچه‌ی زمانی پاسخ تغییر مکان سازه هستند، ولی کاهش ناشی از کنترل‌کننده‌ی منطق فازی



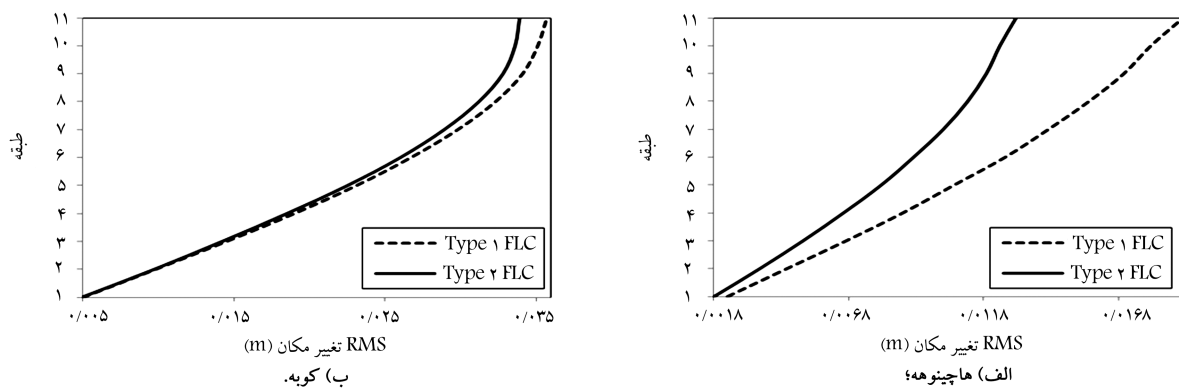
شکل ۱۲. مقایسه‌ی تاریخی زمانی پاسخ ATMD در کنترل‌کننده‌های فازی نوع ۱ و ۲ در زلزله‌های هاجینه‌وه و کوبه.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی نیروهای کنترلی در کنترل‌کننده‌های منطق فازی نوع ۱ و ۲ برای زلزله‌ی هاجینه‌وه.



شکل ۱۴. مقایسه‌ی نیروهای کنترلی در کنترل‌کننده‌های منطق فازی نوع ۱ و ۲ برای زلزله‌ی کوبه.



شکل ۱۵. نمودارهای RMS تغییر مکان طبقات سازه‌ی ۱۱ طبقه.

است که کنترل‌کننده‌ی فازی نوع ۲ بازه‌ی در زلزله‌های میدان دور از کنترل‌کننده‌ی فازی نوع ۱ در کاهش پاسخ سازه بسیار مؤثرتر است.

جدول ۵. RMS نیروی کنترل.

| RMS نیروی کنترل (kN) | |
|----------------------|----------|
| Type\FLC | Type\FLC |
| زلزله‌ی هاچینوهه | |
| ۱۹۰/۸ | ۲۶۰/۶ |
| زلزله‌ی کوبه | |
| ۸۴/۷ | ۱۳۸/۴ |

۶. نتیجه‌گیری

بررسی مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی کنترل سازه‌ها با میراگرهای جرمی فعال نشان می‌دهد که تاکنون هیچ‌گونه پژوهشی در ارتباط با کاربرد سیستم‌های منطق فازی نوع ۲ بازه‌ی، به عنوان الگوریتم کنترل فعال برای ایجاد نیروی کنترل در ATMD انجام نشده است. در این پژوهش، کاربرد کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ بازه‌ی برای ایجاد نیروی کنترل در ATMD و مقایسه‌ی آن با کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۱ تحت تحریک‌های مختلف زلزله مورد مطالعه قرار گرفت. جهت بررسی کارایی کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی از یک سازه‌ی ۱۱ طبقه‌ی برشی استفاده شد و ATMD در تراز بام قرار گرفت. به سبب ارتباط مستقیم بین مقاومت سازه با پاسخ تغییرمکان و نیز آسایش ساکنان ساختمان با پاسخ شتاب، در این پژوهش به بحث در ارتباط با هر دو نوع پاسخ یادشده پرداخته شد و نتایج نشان داد که کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ بازه‌ی در مقایسه با کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۱، بیشینه‌ی تغییرمکان و شتاب بام سازه را به‌طور میانگین در حدود ۱۵٪ و ۱۰٪، بیشتر کاهش می‌دهد. همچنین با مقایسه‌ی نمودارهای مربوط به RMS تغییرمکان می‌توان دریافت که تغییرمکان در طول زمان طبقات در حالت استفاده از کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ دارای کاهش بیشتری نسبت به کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۱ است. درصد کاهش RMS تغییرمکان بام برای کنترل‌کننده‌ی فازی نوع ۲ نسبت به نوع ۱ برای زلزله‌های میدان دور (هاچینوهه) و میدان نزدیک (کوبه) به ترتیب برابر با ۳۳ و ۸ درصد است. کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ نیازمند بیشینه‌ی نیروی کنترل فعال تا حد کمی بیشتر، نسبت به کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۱ است. این مقدار قابل توجه نیست و به‌طور میانگین، کمتر از ۸٪ است.

نوع ۲ بازه‌ی، بیشتر از کنترل‌کننده‌ی فازی نوع ۱ است. به عبارت دیگر، کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲، علاوه بر اینکه بیشینه‌ی پاسخ سازه را برای زلزله‌های میدان نزدیک و میدان دور به اندازه‌ی قابل توجهی نسبت به کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۱ کاهش می‌دهد، باعث کاهش پاسخ سازه در طول زمان نیز می‌شود. این کاهش پاسخ در طول زمان برای زلزله‌های میدان دور (هاچینوهه) بیشتر است. همچنین پاسخ کنترل‌شده با کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ بازه‌ی، دارای رفتار نرم‌تری در طول زمان نسبت به نوع ۱ است.

با توجه به شکل ۱۲، می‌توان تاریخچه‌ی زمانی مربوط به پاسخ ابزار کنترلی (ATMD) در حالت استفاده از کنترل‌کننده‌ی فازی نوع ۱ و ۲ را مشاهده کرد. با مقایسه‌ی نمودارهای شکل ۱۲ می‌توان دریافت که بیشینه‌ی تغییرمکان ابزار کنترلی در کنترل‌کننده‌ی نوع ۱ و ۲، تقریباً یکسان است و RMS تغییرمکان مشابهی دارند.

نیروهای کنترلی در طول زمان برای کنترل‌کننده‌ی نوع ۱ و ۲ برای دو زلزله‌ی هاچینوهه (میدان دور) و کوبه (میدان نزدیک) در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است. همچنین می‌توان RMS نیروی کنترل مربوط به کنترل‌کننده‌ی نوع ۱ و ۲ برای زلزله‌های هاچینوهه و کوبه را در جدول ۵ مشاهده کرد. با بررسی نیروهای کنترلی در طول زمان می‌توان نتیجه گرفت که کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ بازه‌ی، نیازمند بیشینه‌ی نیروی کنترل فعال نسبتاً بزرگ‌تری نسبت به کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۱ است. این تذکر لازم است که تفاوت در بیشینه‌ی نیروی کنترل فعال کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۱ و ۲ قابل توجه نیست و کمتر از ۸٪ است. گرچه نیروی کنترل فعال نسبتاً بزرگ‌تر، نیازمند هزینه‌های اضافی ناچیز است؛ ولی می‌تواند با کاهش بیشتر بیشینه‌ی تغییرمکان طبقات، باعث کوچک‌تر شدن مقاطع سازه‌ی و صرفه‌ی اقتصادی شود و هزینه‌های اضافی جزئی در ایجاد نیروی کنترل را توجیه کند.

برتری کنترل‌کننده‌ی فازی نوع ۲ بازه‌ی نسبت به نوع ۱ را با معیار RMS تغییرمکان نیز می‌توان نشان داد. این معیار برای طبقات مختلف سازه‌ی ۱۱ طبقه‌ی موردنظر، به ازاء یک زلزله‌ی میدان دور (هاچینوهه) و یک زلزله‌ی میدان نزدیک (کوبه)، در حالت استفاده از کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۱ و نوع ۲ بازه‌ی، محاسبه و نتایج آن در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود. مقایسه‌ی نمودارهای مذکور نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌ی منطق فازی نوع ۲ بازه‌ی، RMS تغییرمکان طبقات را بیشتر از کنترل‌کننده‌ی فازی نوع ۱ کاهش می‌دهد. این اختلاف در زلزله‌های میدان دور (هاچینوهه) بیشتر از زلزله‌های میدان نزدیک (کوبه) است. این امر نشانگر این

منابع (References)

پانویس‌ها

1. tuned mass dampers
2. ElCentro
3. Hachinohe
4. Northridge
5. Kobe

1. Frahm, H., *Device for Damping Vibration of Bodies*, No. 989 and 958, U.S. Patent (1911).
2. Warburton, G.B. and Ayorinde, E.O. "Optimum absorber parameters for simple systems", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **8**(3), pp. 197-217 (1980).

3. Warburton, G.B. "Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, **10**(3), pp. 381-401 (1982).
4. Gupta, Y.P. and Chandrasekaran, A.R. "Absorber system for earthquake excitation", *Proc. 4th World Conf. on Earthquake Engineering*, Chile, **11**, pp. 139-148 (1969).
5. Wirsching, H.P. and Yao, J.T. "Safety design concepts for seismic structures", *Computer & Structures*, **3**(4), pp. 809-826 (1973).
6. Keynia, A.M. and Veneziano, D. "Seismic effectiveness of tuned mass damper", *Journal of Structural Dynamic*, *ASCE*, **107**(8), pp. 1465-1484 (1981).
7. Villaverde, R. "Reduction in seismic response with heavily-damped vibration absorbers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, **13**(1), pp. 33-42 (1985).
8. Sadek, F. and Mohraz, B. "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, **26**(6), pp. 617-635 (1997).
9. Rana, R. and Soong, T.T. "Parametric study and simplified design of tuned mass dampers", *Journal of Engineering Structures*, **20**(3), pp. 193-204 (1998).
10. Leung, A.Y.T. and Zhang, H. "Particle swarm optimization of tuned mass dampers", *Journal of Engineering Structures*, **31**(3), pp. 715-728 (2009).
11. Marano, G.C., Greco, R. and Chiaia, B. "A comparison between different optimization criteria for tuned mass dampers design", *Journal of Sound and Vibration*, **329**(23), pp. 4880-4890 (2010).
12. Bekdaş, G. and Nigdeli, S. "Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search", *Journal of Engineering Structures*, **33**(9), pp. 2716-2723 (2011).
13. Yao, J.T.P. "Concept of structural control", *Journal of Structural Division*, *ASCE*, **98**(7), pp. 1567-1573 (1972).
14. Chang, J.C.H. and Soong, T.T. "Structural control using active tuned mass damper", *Journal of Engineering Mechanics Division*, *ASCE*, **106**(6), pp. 1091-1098 (1980).
15. Abdel-Rohman, M. "Optimal design of active TMD for buildings control", *Journal of Building and Environment*, **19**(3), pp. 191-195 (1984).
16. Collins, R. and Basu, B. "Control strategy using bang-bang and minimax principle for FRF with ATMDs", *Journal of Engineering Structures*, **28**(3), pp. 349-356 (2006).
17. Battaini, M., Casciati, F. and Faravelli, L. "Fuzzy control of structural vibration an active mass system driven by a fuzzy controller", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, **27**(11), pp. 1267-1276 (1998).
18. Aldawod, M., Naghdy, F., Samali, B. and Kwod, K.C.S. "Active control of wind excited structures using fuzzy logic", *IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings*, pp. 22-25 (1999).
19. Aldawod, M. and Samali, B. "Active control of along wind response of tall building using a fuzzy controller", *Journal of Engineering Structures*, **23**(11), pp. 1512-1522 (2001).
20. Samali, B. and Al-Dawod, M. "Performance of a five-storey benchmark model using an active tuned mass damper and a fuzzy controller", *Journal of Engineering Structures*, **25**(13), pp. 1597-1610 (2003).
21. Samali, B. and Al-Dawod, M. "Active control of cross wind response of 76-story tall building using a fuzzy controller", *Journal of Engineering Mechanics*, *ASCE*, **130**(4), pp. 492-498 (2004).
22. Ahlwat, A.S. and Ramaswamy, A. "Multiobjective optimal fuzzy logic control system for response control of wind-excited tall buildings", *Journal of Engineering Mechanics*, *ASCE*, **130**(4), pp. 524-530 (2004).
23. Pourzeynali, S., Lavasani, H.H. and Modarayi, A.H. "Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms", *Journal of Engineering Structures*, **29**(3), pp. 346-357 (2007).
24. Wang, A. and Lin, Y. "Vibration control of a tall building subjected to earthquake excitation", *Journal of Sound and Vibration*, **299**(4-5), pp. 757-773 (2007).
25. Guclu, R. and Yazici, H. "Vibration control of a structure with ATMD against earthquake using fuzzy logic controllers", *Journal of Sound and Vibration*, **318**(1-2), pp. 36-49 (2008).
26. Zadeh, L.A. "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I", *Information Sciences*, **8**(3), pp. 199-249 (1975).
27. Karnik, N.N. and et al. "Type-2 fuzzy logic systems", *IEEE Trans Fuzzy Systems*, **7**, pp. 643-658 (1999).
28. Mendel, J.M. and John, R.I.B. "Type-2 fuzzy sets made simple", *IEEE Trans Fuzzy Systems*, **10**(2), pp. 117-127 (2002).
29. Qilian, L. and Mendel, J.M. "Interval type-2 fuzzy logic systems: Theory and design", *IEEE Trans Fuzzy Systems*, **8**(5), pp. 535-550 (2000).
30. Mendel, J. M. and et al. "Interval type-2 fuzzy logic systems made simple", *IEEE Trans Fuzzy Systems*, **14**(6), pp. 808-821 (2006).
31. Karnik, N.N. and Mendel, J.M. "Type-2 fuzzy logic systems: Type-reduction, in systems, man, and cybernetics", *IEEE International Conference*, **2**, pp. 2046-2051 (1998).
32. Karnik, N.N. and Mendel, J.M. "Centroid of a type-2 fuzzy set", *Information Sciences*, **132**(1-4), pp. 195-220 (2001).
33. Mendel, J.M. "Advances in type-2 fuzzy sets and systems", *Information Sciences*, **177**(1), pp. 84-110 (2007).
34. Tan, D.W.W.W. "A simplified type-2 fuzzy logic controller for real-time control", *ISA Transactions*, **45**(4), pp. 503-516 (2006).
35. Lin, T.C. and et al. "Direct adaptive interval type-2 fuzzy control of multivariable nonlinear systems", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **22**(3), pp. 420-430 (2009).
36. Hsiao, M.Y. and et al. "Design of interval type-2 fuzzy sliding-mode controller", *Information Sciences*, **178**(6), pp. 1696-171 (2008).