



تأثیر کاربرد میراگر جرمی تنظیم شونده فعال روی نمودار زمان دوام ساختمان‌های بلند مرتبه

مسعود ذبیحی سامانی^{۱*}، محسن علی شایان‌فر^۲، محمدرضا کرباسی^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲- دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۳/۰۷
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۳
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:

ارزیابی سطح عملکرد سازه
زمان دوام
میراگر جرمی تنظیم شونده فعال
طراحی عملکردی
کنترل فازی (ممدانی)

خلاصه: امروزه طراحی سازه‌ها به سمت طراحی بر اساس سطح عملکرد پیش می‌رود. طراحی بر اساس عملکرد برای سازه‌ها، مستلزم آنالیزهای سنگین و مکرر دینامیکی می‌باشد. روش تحلیلی زمان دوام یک روش دینامیکی نوین که بر مبنای عملکرد سازه بنا شده، و موجب کاهش تعداد آنالیزهای سازه می‌شود. در این روش سازه در معرض توابع شتاب فزاینده در طول زمان قرار گرفته و سپس عملکرد لرزه‌ای سازه با پارامترهای تقاضای مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این مقاله، با استفاده از روش زمان دوام عملکرد یک سازه مجهز به میراگر جرمی فعال تحت توابع شتاب زمان دوام سری ETA_{2000} که از جدیدترین آن‌ها هستند، مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور یک سازه ۱۱ طبقه مجهز به میراگر جرمی فعال، به کمک یکی از روش‌های کنترل فازی (ممدانی) در نرم افزار متلب مدل‌سازی شده و سپس با بررسی نتایج حاصل از نمودارهای زمان دوام ترسیم شده برای حالت‌های قبل و بعد از به‌سازی با میراگر جرمی تنظیم شونده فعال، به کارایی این سیستم در کاهش جابجایی نسبی بین طبقات و حداکثر جابجایی طبقه آخر پرداخته شده است. همچنین نتایج حاصل از روش زمان دوام تحت توابع شتاب سری ETA_{2000} با روش تاریخچه زمانی حاصل از هفت شتاب‌نگاشت انتخابی، مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد توابع زمان دوام پیش‌بینی مناسبی در تخمین رفتار سازه تحت شتاب‌نگاشت انتخابی ارائه کرده است. نتایج نشان دهنده تأثیر چشمگیر افزودن میراگر جرمی در افزایش زمان دوام ساختمان مورد بررسی می‌باشد.

۱- مقدمه

پیدا کردن ایده‌های جدید و بهتر برای حفظ سازه در برابر اثرات تخریبی ناشی از نیروهای محیطی مثل زلزله و باد از مسائل مهم برای مهندسی سازه است. یکی از نوین‌ترین و موثرترین راهکارها سازه‌ها است که برای افزایش کارایی و ایمنی آن در برابر خطرات طبیعی به کار می‌رود [۱]. کنترل سازه را می‌توان در چهار دسته کنترل غیر فعال، فعال، نیمه فعال و ترکیبی طبقه بندی کرد. سیستم کنترلی غیر فعال شامل یک سری از میراگرهای خارجی که می‌تواند به سازه اضافه و باعث جذب انرژی و کاهش پاسخ‌های سازه تحت بارهای فعال شوند.

یکی از متداول‌ترین سیستم کنترلی منفعل، میراگر جرمی غیر فعال است که به خاطر سادگی و هزینه کم بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. در سیستم TMD میرایی، سختی و جرم میراگر جرمی به سازه اصلی اضافه تا باعث افزایش ظرفیت سازه در برابر بارهای مختلف شود. میراگر جرمی

1 Tuned Mass Damper

تنظیم شونده غیر فعال، دارای نواقص و محدودیت‌هایی از جمله، ظرفیت کنترلی محدود و مشکلاتی در ارتباط با نامیزان شدن فرکانس اصلی سازه در یک دامنه فرکانسی محدود است. در سال‌های اخیر، برای بهبود این نواقص و محدودیت‌ها در میراگر جرمی غیر فعال، ایده‌ی تحت عنوان میراگر جرمی فعال $ATMD$ ارائه شد. این میراگر همانند میراگر جرمی غیر فعال است با این تفاوت که اضافه شدن یک منبع انرژی و اعمال نیروی خارجی توسط محرک‌ها به سازه، باعث بهبود عملکرد آن می‌شود [۲].

سون و همکاران [۳]، یک پژوهش گسترده‌ای در رابطه با میراگر جرمی فعال و غیر فعال انجام دادند که نتایج این تحقیق نشان دهنده‌ی کاهش قابل توجه پاسخ‌های سازه مجهز به میراگر جرمی فعال در مقایسه با حالت غیر فعال می‌باشد. همچنین آیزاوا و همکاران [۴] در آزمایشات میز لرزان به کارایی میراگر جرمی فعال در کنترل پاسخ و اجرای مدل واقعی از سازه را مورد بررسی قرار دادند. فرزام پور [۵] نیز در تحقیق دیگری برای به دست آوردن راندمان مناسب‌تر در کاهش پاسخ‌های سازه به جای میراگر تنظیم

2 Active Tuned Mass Damper

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mzabihi@iust.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



عملکرد انواع سیستم کنترلی غیرفعال، مهندسی ارزش و سایر زمینه‌های مهندسی عمران انجام داده‌اند ولی تاکنون در زمینه ارزیابی رفتار سیستم کنترلی فعال به کمک روش زمان دوام تحقیقات محدودی انجام شده است. در واقع ویژگی متمایز کننده این تحقیق در آن است که با استفاده از روش زمان دوام برای نخستین بار به بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده فعال پرداخته می‌شود.

به همین منظور در این تحقیق، یک سازه‌ی یازده طبقه بتنی مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده فعال با کمک سیستم کنترلی فازی (ممدانی) و نرم افزار متلب^۱ و نرم افزار جانبی آن (سیمولینک^۲) مدل سازی شده است [۱۵]، سپس سازه به کمک روش زمان دوام و ترسیم منحنی‌های عملکرد، با در نظر گرفتن پارامتر جابجایی نسبی بین طبقات در حالت قبل و بعد از به‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، در این تحقیق از نسل ششم توابع زمان دوام به منظور بررسی دقیق‌تر استفاده شده، که ویژگی این سری از توابع زمان دوام پوشش دادن دوره‌های تناوب طولانی و دقت مناسب در آنالیزهای غیرخطی است.

۲- روش زمان دوام

روش زمان دوام، یک روش تجزیه و تحلیل لرزه‌ای است. در این روش سازه تحت یک سری از تحریک‌های دینامیکی فزاینده قرار گرفته و سپس پاسخ‌های ناشی از این تحریک‌ها ثبت شده و به کمک نمودارهای زمان دوام، عملکرد سازه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مراحل ارزیابی سازه با روش زمان دوام بدین صورت است که در گام اول، تهیه مجموعه توابع شتاب زمان دوام مناسب جهت انجام تحلیل. در گام دوم، مقیاس کردن توابع شتاب بر اساس ضوابط آیین نامه. در گام سوم، تعیین زمان هدف (زمانی است که پاسخ ناشی از توابع شتاب زمان دوام منطبق بر پاسخ‌های ناشی از شتاب‌نگاشت‌های واقعی می‌باشد). در گام چهارم، تحلیل تاریخچه زمانی برای سازه مدل‌سازی شده با استفاده از توابع شتاب زمان دوام و در گام آخر، منحنی پاسخ سازه برای پارامترهای تقاضای مختلف ترسیم شده و سپس با مقایسه این نتایج به دست آمده با مقادیر مجاز آیین‌نامه در زمان هدف مشخص شده، عملکرد سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۶] در شکل ۱ ارزیابی عملکرد پاسخ سازه با در نظر گرفتن پارامتر تقاضا مختلف مشاهده می‌شود.

شونده منفعل (PTMD) از میراگر جرمی تنظیم شونده فعال (ATMD) استفاده کرد نتایج آن نشان داد که سیستم ATMD علی‌رغم داشتن هزینه بالای نصب، باعث کاهش قابل توجهی در مقدار برش پایه طبقه نسبت به PTMD می‌باشد.

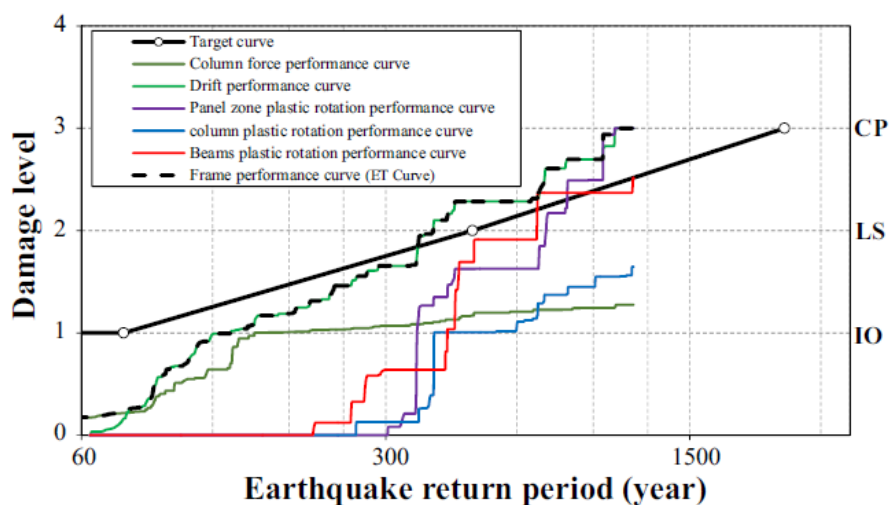
در میراگر جرمی فعال به مقادیر زیادی از انرژی توسط جک‌های خارجی مورد نیاز است که بسیار پر هزینه بوده و حتی ممکن است باعث ناپایداری یک سازه برخلاف حالت غیر فعال شود. بنابراین نیروی خارجی باید توسط یکی از روش‌های کنترلی مانند: روش تنظیم کننده خطی [۶]، روش تنظیم کننده درجه دو خطی [۷]، روش کنترل فازی و یا سایر روش‌ها، بهینه سازی و تنظیم شود [۸]. پورزینالی و همکاران [۹]، برای کاهش بیشتر جابجایی سازه‌ی مجهز به میراگر جرمی فعال از ترکیب الگوریتم ژنتیک با منطق فازی استفاده کردند تا بتوانند به کمک الگوریتم ژنتیک، پارامترهای سیستم کنترل فازی و میراگر جرمی فعال را بهینه یابی کنند که نتایج آن نشان داد، این سیستم کنترل ترکیبی باعث بهبود عملکرد میراگر جرمی فعال شده است.

تاکنون روش‌های تحلیلی جدیدی از جمله روش خطی استاتیکی، دینامیکی خطی، روش استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی برای ارزیابی سازه‌ها ارائه شده است. اما به علت نواقص و محدودیت‌هایی که در روش‌های استاتیکی وجود دارد این روش کمتر در تحلیل عملکردی مورد استفاده قرار گرفته است. از طرفی روش‌های دینامیکی اگر چه دارای مطلوبیت مناسب‌تر می‌باشد اما به دلیل انجام تعداد دفعات زیاد تحلیل، بسیار وقت گیر و هزینه بر هستند [۱۰]. به همین منظور برای بهبود و رفع نواقص روش‌های پیشین، ایده جدیدی به نام روش زمان دوام که به عنوان یک روش دینامیکی افزایشی می‌باشد نخستین بار توسط استکانچی و همکاران [۱۱] مطرح شد که در این روش با اعمال یک سری از توابع شتاب فزاینده‌ی از پیش طراحی شده، عملکرد لرزه‌ای سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

روش زمان دوام با ارائه تخمین مناسب از پاسخ سازه در شدت تحریک‌های مختلف متناسب با طیف طرح، موجب صرفه‌جویی در تعداد تحلیل‌ها، جهت ارزیابی سازه در مقایسه با سایر روش‌ها می‌باشد. در مطالعات انجام شده، کارایی مناسب این روش در تحلیل سازه مجهز شده به انواع میراگر غیرفعال بررسی شده است [۱۳ و ۱۲]، همچنین این روش در مقایسه با سایر روش‌های خطی و غیرخطی، به علت نوع تحلیل که بر اساس روش تاریخچه زمانی است هیچ محدودیت برای لحاظ کردن پیچیدگی‌های رفتاری سازه از قبیل رفتار غیرخطی، اثر سیستم‌های کنترلی و غیره ندارد [۱۴].

محققین با استفاده از روش زمان دوام تحقیقات زیادی در زمینه بررسی

1 Matlab
2 Simulink



شکل ۱. ارزیابی عملکرد با روش زمان دوام [۱۶]

Fig. 1. Performance evaluation by endurance time (ET) method

سطح زیر طیف هر شتاب‌نگاشت با سطح زیر طیف آیین نامه برابر شود. پس از تعیین ضرایب اولیه هفت شتاب‌نگاشت به گونه‌ای مقیاس می‌شود که در بازه $0.2T$ تا $1.5T$ در بالای طیف‌های مربوط به هر سطح خطر آیین نامه ASCE41 قرار گیرند، که این مقیاس سازی بر اساس تناوب اصلی سازه صورت می‌گیرد. در جدول ۱، مشخصات هفت شتاب‌نگاشت انتخابی و ضرایب مقیاس اولیه تحت مجموعه‌ای به نام GM1 و در جدول ۲ ضرایب مقیاس برای سازه یازده طبقه با زمان تناوب 0.975 ثانیه برای سطوح خطر مختلف نشان داده شده است.

۴- تعیین توابع و زمان هدف

در روش زمان دوام انتخاب نوع توابع شتاب مناسب، اهمیت اساسی در سازگاری و دقت نتایج به دست آمده خواهد داشت. از این رو برای تخمین پاسخ‌های غیرخطی مجموعه GM1 برای سازه مجهز شده به میراگر جرمی فعال از نسل ششم توابع شتاب زمان دوام به نام ETA20e01-03 استفاده شده است. ویژگی‌های این سری نسل از توابع زمان دوام، دقت مناسب در آنالیزهای غیرخطی و همچنین پوشش دادن دوره‌های تناوب طولانی می‌باشد [۱۹].

تفسیر صحیح از نتایج تحلیل زمان دوام و نحوه‌ی نگاشت زمان در توابع آن به شدت لرزه‌ای بستگی دارد به عبارت دیگر، کافی است که طیف توابع

۳- تهیه شتاب‌نگاشت منطبق با آیین نامه ASCE

در این تحقیق، از آیین نامه ASCE41-17 تحت عنوان به‌سازی لرزه‌ای ساختمان‌ها که توسط موسسه ASCE ارائه گردیده، استفاده شده است [۱۷]. در این آیین نامه، طراحی سازه بر اساس عملکرد لرزه‌ای است و شامل پنج سطح عملکردی غیرسازه‌ای می‌باشد که به سطوح خطر نام گذاری شده‌اند. سطوح خطر شامل: سطح خطر BSE-2 که نمایانگر شدیدترین زلزله محتمل با احتمال رخداد ۲٪ در ۵۰ سال یا دوره بازگشت ۲۴۷۵ ساله می‌باشد. سطح خطر BSE-1 با احتمال رخداد ۱۰٪ در طی ۵۰ سال با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله. سطح خطر فرعی که شامل سطح خطر $0.2/50y$ ٪ با احتمال رخداد ۲۰٪ طی سال معادل دوره بازگشت ۲۲۵ سال و $0.2/50y$ ٪ زلزله با احتمال رخداد ۵۰٪ در طی ۵۰ سال معادل دوره بازگشت ۷۲ سال نیز تعریف شده است.

طبق ضوابط این آیین نامه برای تحلیل تاریخچه زمانی، هفت سری شتاب‌نگاشت را می‌توان در نظر گرفت و سپس از مقادیر میانگین پاسخ سازه برای بررسی عملکرد آن استفاده کرد. در این مقاله هفت رکورد زلزله از بین رکوردهای آیین نامه FEMA 440 ثبت شده بر روی خاک نوع C، انتخاب گردیده است [۱۸]. برای استفاده از این شتاب‌نگاشت‌ها در تحلیل‌های غیرخطی، ابتدا بدون در نظر گرفتن سطح خطر، رکوردها بر اساس آیین نامه‌ی ۲۸۰۰ مقیاس شوند که برای تعیین این ضرایب مقیاس اولیه باید

جدول ۱. مشخصات شتاب‌نگاشت‌های مجموعه GMI

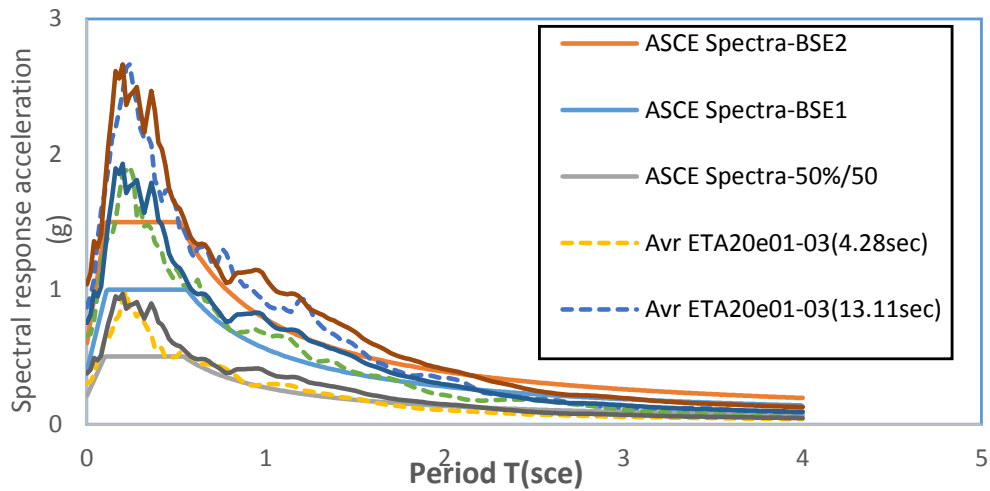
Table 1. Specifications of GMI set accelerograms

DATA	Earthquakes name	Magnitude (Ms)	Station number	Component (deg)	PGA (cm/s ²)	Scale factor
۰۶/۲۸/۹۲	Landers	۷٫۵	۱۲۱۴۹	۰	۱۶۷٫۵	۳٫۶۳۷۸
۱۰/۱۷/۸۹	Loma Prieta	۷٫۱	۵۸۰۶۵	۰	۴۹۴٫۵	۱٫۴۳۷
۰۱/۱۷/۹۴	Northridge	۶٫۸	۲۴۲۷۸	۳۶۰	۵۰۴٫۲	۱٫۰۷۳
۰۴/۲۴/۸۴	Morgan Hill	۶٫۱	۵۷۳۸۳	۹۰	۲۸۰٫۴	۱٫۸۳۶
۱۰/۱۷/۸۹	Loma Prieta	۷٫۱	۴۷۰۰۶	۶۷	۳۴۹٫۱	۲٫۲۰۴
۱۰/۱۷/۸۹	Loma Prieta	۷٫۱	۵۸۱۳۵	۳۶۰	۴۳۳٫۱	۲٫۲۸۹
۱۰/۱۷/۸۹	Loma Prieta	۷٫۱	۱۶۵۲	۲۷۰	۲۳۹٫۴	۳٫۶۰۹۲

جدول ۲. ضرایب مقیاس در سطوح خطر ASCE41-06

Table 2. Scale coefficients at ASCE41-06 risk levels

سازه ۱۱ طبقه با زمان تناوب ۰٫۹۷۵ ثانیه	
سطوح خطر	ضریب مقیاس
BSE-1	۰٫۹۶۵
BSE-2	۱٫۳۷۵
e%50/50year	۰٫۴۸۸



شکل ۲. طیف آیین نامه ASCE41-17، طیف مقیاس شده میانگین مجموعه (GM1) و طیف سری e در سطوح خطر مختلف

Fig. 2. ASCE41-17 regulation spectrum, the scaled spectrum of the average set (GM1) and e series of mean Scale range at different risk levels

$$k = \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & \dots & & 0 \\ -K_2 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & K_{i,j} & \\ & & \ddots & -K_n \\ 0 & \dots & -K_n & K_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$m = \begin{bmatrix} m_1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & m_2 & & 0 \\ 0 & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_n \end{bmatrix}$$

سپس طبق رابطه ۲ ماتریس میرایی از ترکیب ماتریس جرم و سختی سازه تعیین می‌شود و ضرایب b_0 ، a_0 برای مود اول و دوم سازه

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

با در نظر گرفتن میرایی $\xi_{ij} = 5\%$ طبق رابطه ۳ به دست می‌آید.

شتاب زمان دوام در یک زمان مشخص (زمان هدف) با یکی از طیف‌های طراحی یا طیف متوسط رکوردهای زلزله و یا طیف پاسخ ناشی از آنالیز خطر لرزه‌ای، مطابقت داشته باشد [۲۰]. همانطور در شکل ۲ مشاهده می‌شود برای تعیین زمان هدف سری سعی شده از انطباق طیف میانگین این توابع با طیف میانگین مجموعه (GM1) استفاده شود که در جدول ۳ زمان هدف برای سطوح خطر BSE-1، BSE-2 و y ۵۰/۵۰٪ ذکر شده است.

۵- معادله حرکت سیستم

در این مقاله یک ساختمان یازده طبقه بتنی که از نظر سیستم سازه جزء ساختمان‌های بتنی متوسط است، مدل‌سازی شده که فرضیات مدل‌سازی به شرح ذیل می‌باشد:

- ۱- هر طبقه مانند یک دیافراگم صلب فرض شده است
- ۲- جرم هر طبقه مانند یک جرم متمرکز در نظر گرفته شده است
- ۳- رفتار مصالح در محدوده خطی فرض شده است
- مشخصات سازه مدل‌سازی شده شامل: جرم و سختی هر طبقه در جدول ۴ نمایش داده شده است که ماتریس سختی و جرم سازه با داشتن سختی و جرم هر طبقه بر اساس روابط ۱ تعیین می‌شود [۹].

جدول ۳. زمان هدف تابع شتاب زمان دوام در سطوح خطر ASCE41-17

Table 3. Target time of the endurance time acceleration function at ASCE41-17 risk levels

سطح خطر	زمان هدف ETA20e01-03
BSE-2	۱۳,۱۱(s)
BSE-1	۹,۰۶(s)
%50/50year	۴,۲۸(s)

میراگر جرمی فعال از یک جرم، یک فنر، میرایی و نیروی کنترلی فعال تشکیل شده است که این نیروی فعال بر اساس الگوریتم کنترلی به سازه اعمال می‌شود و مشخصات فیزیکی آن از جمله جرم میراگر (M_t)، سختی (K_t) و ضریب میرایی (C_t) به کمک روابط ۵ تعیین می‌شود.

$$C_t = 2\xi \times \sqrt{k_t m_t}$$

$$K_t = M_t \times (\beta \times \omega_l)^2 \quad (5)$$

$$M_t = m_0 \times M_{building}$$

در روابط ذکر شده بالا m_0 نسبت جرم میراگر جرمی به جرم کل سازه است و ξ درصد میرایی میراگر جرمی می‌باشد. برای به دست آوردن مقادیر بهینه پارامترهای سیستم ATMD در شکل ۵ نسبت تغییر مکان طبقه آخر در حالت کنترل شده به حالت کنترل نشده به ازای ξ و مقدار $m_0 = \{0.1, 0.2, \dots, 2.0\}$ ، مقادیر درصد میرایی $\beta = \{0.9, 1, 1.1, 1.2\}$ تحت رکورد زلزله انتخابی مورد مقایسه قرار گرفته و پارامتر به دست آمده همان مقادیر بهینه است که توسط پوزینالی و همکاران [۹]، برای بهینه سازی یک سیستم کنترلی فعال ارائه شده، که صحت نتایج تحقیق را تا این مرحله نشان می‌دهد. بعد از تعیین پارامترهای بهینه، مقادیر جرم، سختی و میرایی میراگر جرمی به ماتریس جرم، سختی و میرایی کل سازه اضافه می‌گردد که بر اساس این مقادیر معادله حرکت برای یک سیستم چند درجه‌ای آزادی

$$b_o = \xi_j \times \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (3)$$

$$a_o = \xi_i \times \frac{2\omega_i \times \omega_j}{\omega_i + \omega_j}$$

بدین ترتیب با داشتن ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی سازه، می‌توان معادله‌ی حرکت برای یک سازه تحت شتاب لرزه‌ای $\ddot{u}_g(t)$ بدون سیستم کنترلی به صورت زیر نوشته شود.

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

که در رابطه بالا u ، \dot{u} ، \ddot{u} به ترتیب بردار جابجایی نسبی و سرعت نسبی و شتاب هر طبقه و $\{r_T\}$ برداری با ابعاد $(n \times 1)$ که نظیر درجات آزادی در راستای شتاب زلزله در نظر گرفته شده است [۲۶].

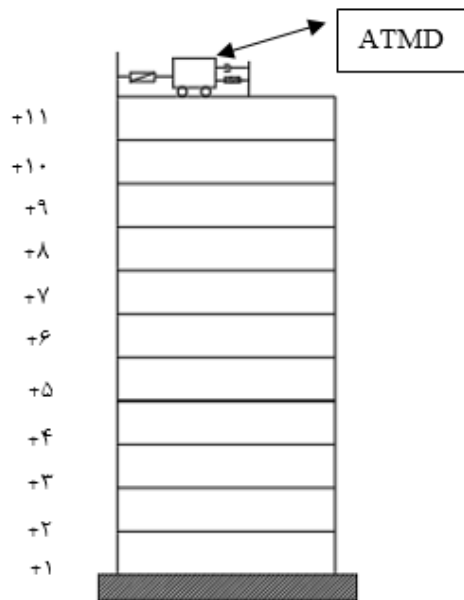
۶- معادله حرکت سازه با وجود میراگر جرمی تنظیم شونده فعال

در این مقاله مطابق با شکل ۳ یک میراگر جرمی فعال ATMD در طبقه آخر این سازه نصب شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود

جدول ۴. مقادیر جرم و سختی سازه

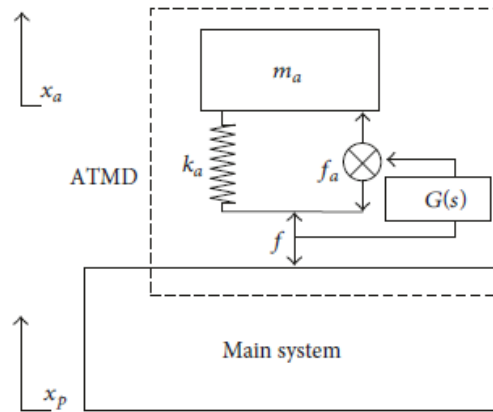
Table 4. Mass and hardness values of the structure

stories	Mass (ton)	Stiffness (kN/m)
۱	۲۱۵	۴۶۸۰
۲	۲۰۱	۴۷۶۰
۳	۲۰۱	۴۶۸۰
۴	۲۰۰	۴۵۰۰
۵	۲۰۱	۴۵۰۰
۶	۲۰۱	۴۵۰۰
۷	۲۰۱	۴۵۰۰
۸	۲۰۳	۴۳۷۰
۹	۲۰۳	۴۳۷۰
۱۰	۲۰۳	۴۳۷۰
۱۱	۱۷۶	۳۱۲۰



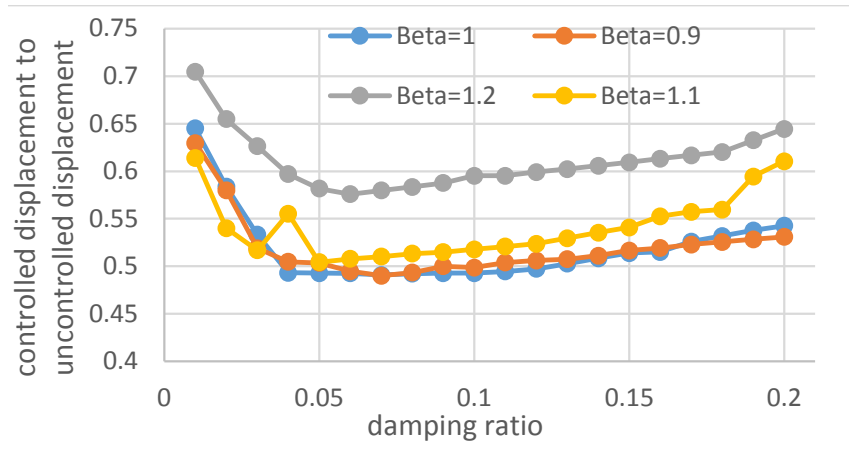
شکل ۳. سازه ۱۱ طبقه مجهز به میراگر جرمی فعال

Fig. 3. 11-story structure equipped with an active mass damper



شکل ۴. شماتیک از سیستم ATMD

Fig. 4. Schematic of ATMD system



شکل ۵. نسبت تغییر مکان طبقه آخر در حالت کنترل شده به حالت کنترل نشده به ازای مقادیر $m_0 = 3\%$ تحت رکورد Northridge

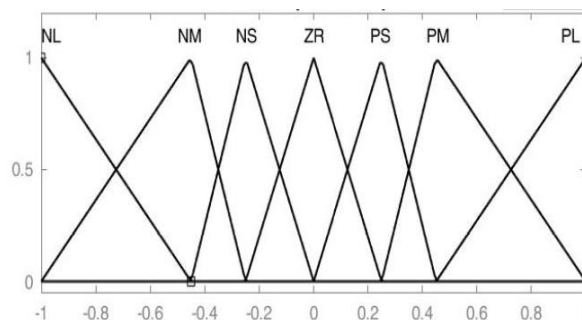
Fig. 5. The ratio of the last floor Drift in the controlled state to the uncontrolled state for $m_0=3\%$ values under the Northridge record

جرمی است و پارامتر u ، \dot{u} ، \ddot{u} به ترتیب بردار جابجایی نسبی، سرعت نسبی و شتاب هر طبقه به ابعاد $(n+m) \times 1$ می باشد و $\{r_T^*\}$ بردار با ابعاد $(n+m) \times 1$ که نظیر درجات آزادی در راستای شتاب زلزله که m نشان دهنده تعداد میراگر جرمی فعال و n تعداد طبقات آن است و ماتریس $[D]$ برداری است که محل اعمال نیروی خارجی توسط میراگر جرمی فعال به سازه را نشان می دهد.

طی تحت شتاب لرزه ای و نیروی کنترلی $\{f\}$ به صورت رابطه ۶ می باشد.

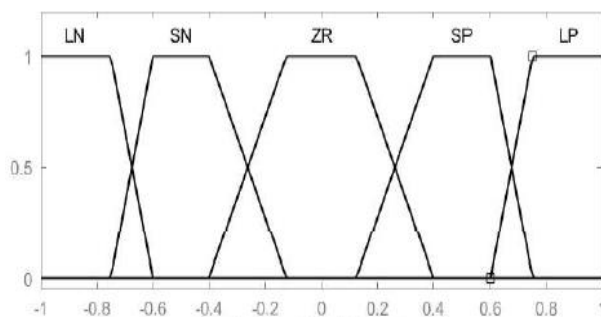
$$\begin{aligned} [M_T^*] \{\ddot{u}\} + [C_T^*] \{\dot{u}\} + [k_T^*] \{u\} = \\ - [M_T^*] \{r_T^*\} \ddot{u}_g(t) + [D] \{f\} \end{aligned} \quad (6)$$

در رابطه فوق M_T^* و K_T^* ماتریس جرم و سختی سازه مجهز شده به میراگر



شکل ۶. توابع عضویت برای متغیر نیروی فعال خروجی

Fig. 6. Membership functions for the active output power variable



شکل ۷. توابع عضویت برای متغیر جابجایی و سرعت ورودی

Fig. 7. Membership functions for the drift variable and input speed

همانطور که در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌شود این توابع خروجی و ورودی دامنه تغییرات بین ۱ تا -۱ دارند.

قوانین فازی برای تعیین نیروی کنترلی فعال که به عنوان خروجی سیستم می‌باشد با استفاده از متغیرهای ورودی و خروجی نوشته شده است، این قوانین هر یک دارای ضرایب وزنی است که در جدول ۵ نمایش داده شده اند [۹].

در این تحقیق از سیستم فازی به روش ممدانی جهت تعیین نیروی فعال میراگر جرمی استفاده شده است. همان طور که قبلاً ذکر شد این سیستم کنترلی شامل دو تابع عضویت ورودی و یک تابع عضویت خروجی است، که تمامی این توابع در دامنه بین ۱ تا -۱ قرار دارند. از این رو در جهت تعیین نیروی کنترلی فعال باید مقادیر این توابع ورودی و خروجی توسط ضرایب مقیاس، به مقدار واقعی تبدیل شوند. ضرایب تعیین شده طبق جدول ۶ در نظر گرفته شده است.

۷- کنترل کننده فعال به کمک منطق فازی

کنترل‌گرها بخش اصلی یک سیستم فعال هستند. کنترل فازی نوع خاصی از کنترل‌های غیرخطی است که استفاده از آن در کاهش پاسخ سازه سهم به سزایی دارد. سیستم‌های فازی یک پایگاه دانش بوده که از قواعد اگر و آن گاه فازی تشکیل شده است این سیستم‌ها شامل دو جزء اصلی، توابع عضویت و قوانین فازی می‌باشد. در این پژوهش برای توابع عضویت ورودی تغییر مکان و سرعت طبقه آخر در نظر گرفته شده است که دارای ۵ متغیر زبانی به ترتیب شامل منفی بزرگ (LN)، منفی کوچک (SN)، صفر (ZR)، مثبت کوچک (SP)، مثبت بزرگ (LP) و برای توابع عضویت خروجی نیروی فعال میراگر جرمی که دارای ۷ متغیر زبانی است که به ترتیب شامل منفی بزرگ (NL)، منفی متوسط (NM)، منفی کوچک (NS)، صفر (ZR)، مثبت کوچک (PS)، مثبت متوسط (PM)، مثبت بزرگ (PL).

جدول ۵. قوانین کنترل فازی

Table 5. Fuzzy control rules

Displacement	Velocity				
	<i>LN</i>	<i>N</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>	
	<i>LP</i>				
<i>LP</i>	$\frac{NS}{0.1}$	$\frac{NS}{0.9}$	$\frac{NM}{0.9}$	$\frac{NL}{0.9}$	$\frac{NL}{0.1}$
<i>P</i>	$\frac{NS}{0.9}$	$\frac{NM}{0.8}$	$\frac{NM}{0.6}$	$\frac{NM}{0.8}$	$\frac{NL}{0.9}$
<i>Z</i>	$\frac{PS}{0.7}$	$\frac{ZR}{1}$	$\frac{ZR}{1}$	$\frac{ZR}{1}$	$\frac{NS}{0.7}$
<i>N</i>	$\frac{PL}{0.9}$	$\frac{PM}{0.8}$	$\frac{PM}{0.6}$	$\frac{PM}{0.8}$	$\frac{PS}{0.9}$
<i>ZN</i>	$\frac{PL}{0.1}$	$\frac{PL}{0.9}$	$\frac{PM}{0.9}$	$\frac{PS}{0.9}$	$\frac{PS}{0.1}$

جدول ۶. ضرایب مقیاس توابع کنترل فازی (ممدانی)

Table 6. Scale coefficients of fuzzy control functions (Mamdani).

نام پارامتر	ضریب مقیاس
تغییر مکان (ورودی)	۲٫۵
سرعت طبقه آخر (ورودی)	۰٫۵
نیروی فعال (خروجی)	$۰٫۰۵ \times$ (وزن ساختمان مدل شده)

۸- شبیه‌سازی میراگر جرمی فعال با کنترل گر فازی

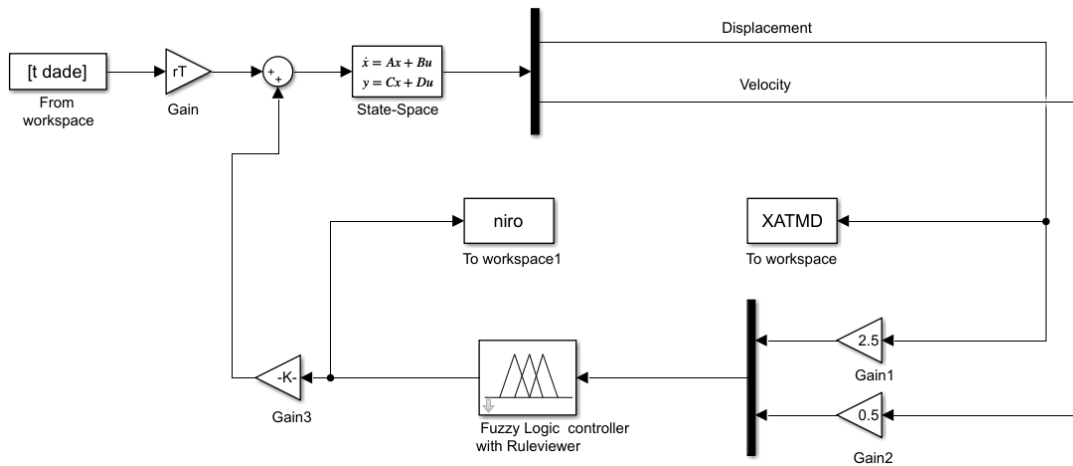
در این پژوهش جهت شبیه‌سازی سیستم فازی به عنوان کنترل‌گر سازه مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده فعال از متلب و نرم افزار شبیه‌سازی سیمولینک استفاده شده است. شکل ۸ دیاگرام بلوکی مدل سازه شبیه‌سازی شده به همراه کنترل کننده فازی (Fuzzycontroller) برای تعیین نیروی کنترلی فعال و اعمال آن به سازه جهت کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای نمایش داده شده است.

همچنین جهت ارزیابی و صحت شبیه‌سازی سیستم کنترل فازی برای یک ساختمان مجهز به میراگر جرمی فعال که در جدول ۷ به مقایسه‌ی جابجایی نسبی طبقات در حالت کنترل شده با میراگر ATMD برای زلزله انتخابی با پژوهشی که توسط پورزینالی و همکارانش صورت گرفته، پرداخته

شده است که نتایج آن، نشان دهنده صحت مدل‌سازی و کارایی مناسب این سیستم کنترلی فازی در بهبود پاسخ‌ها سازه مجهز به میراگر جرمی فعال می‌باشد.

۹- ارزیابی عملکرد میراگر جرمی فعال به کمک روش زمان دوام

پس از توسعه مدل فازی، عملکرد مکانیزم ATMD در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه به کمک روش زمان دوام با در نظر گرفتن پارامترهای جابجایی نسبی بین طبقات و همچنین حداکثر جابجایی طبقه آخر در حالت قبل و بعد از به‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور در نرم افزار، یک سازه یازده طبقه مجهز به میراگر جرمی فعال در طبقه آخر با پارامترهای



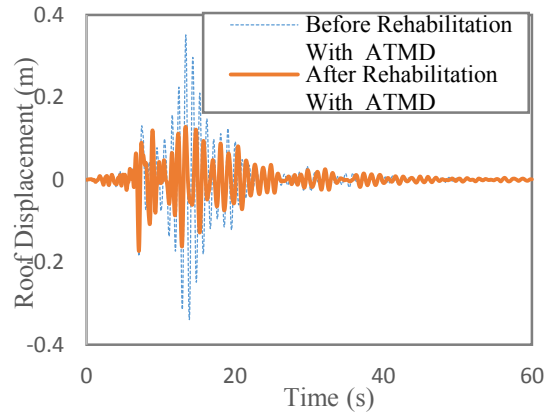
شکل ۸. دیاگرام بلوکی شبیه سازی کنترل هوشمند فازی برای سازه مجهز به میراگر جرمی فعال

Fig. 8. Block diagram of fuzzy intelligent control simulation for a structure equipped with an active mass damper

جدول ۷. جابجایی نسبی هر طبقه تحت زلزله kobe

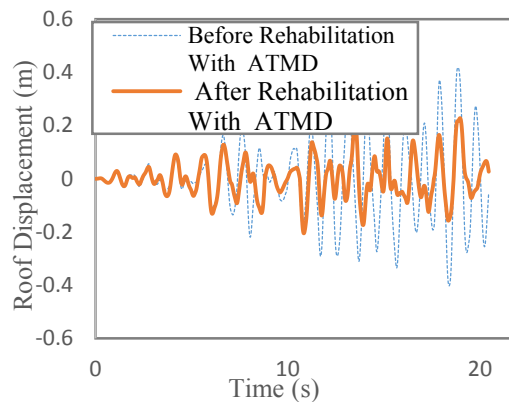
Table 7. Relative drift of each floor under the Kobe earthquake

طبقه	جابجایی کنترل شده	نسبت جابجایی کنترل شده با کنترل نشده	درصد خطا مدل سازی
۱	۰/۰۵۹	۰/۸۱	۴٪
۲	۰/۱۱۷	۰/۸۳	۶٪
۳	۰/۱۷۵	۰/۷۹	۶٪
۴	۰/۲۳۳	۰/۷۹	۴٪
۵	۰/۲۸۷	۰/۷۷	۲٪
۶	۰/۳۳۷	۰/۷۵	۱٪
۷	۰/۳۸۲	۰/۷۴	۱٪
۸	۰/۴۲۱	۰/۷۳	۵٪
۹	۰/۴۵۲	۰/۷۴	۳٪
۱۰	۰/۴۷۳	۰/۷۳	۲٪
۱۱	۰/۴۹	۰/۷۳	۱٪



شکل ۹. مقایسه جابه‌جایی طبقه آخر قبل و بعد از به‌سازی تحت رکورد Northridge

Fig. 9. Comparison of last floor drift before and after improvement under the Northridge record



شکل ۱۰. مقایسه جابه‌جایی طبقه آخر قبل و بعد از به‌سازی تحت رکورد ETA20e02

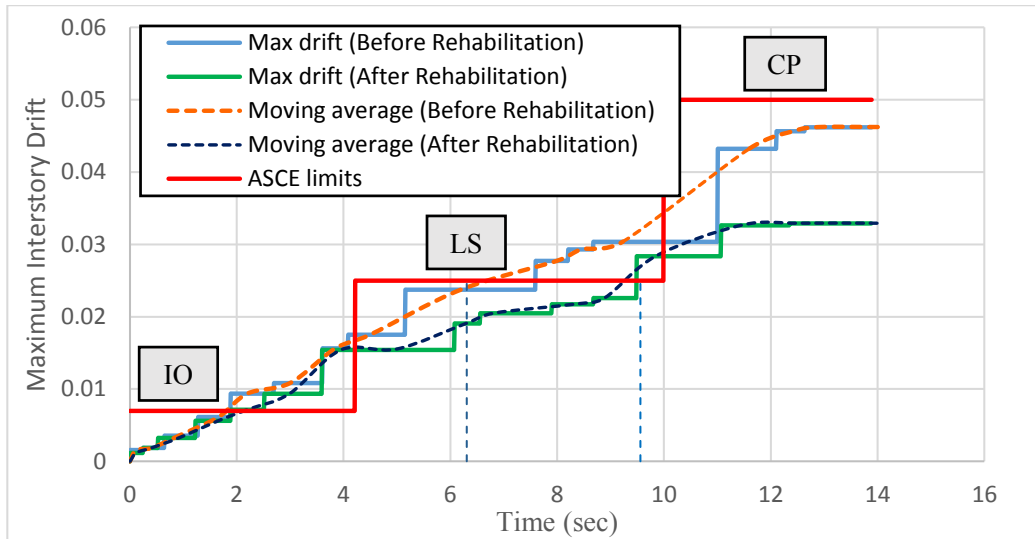
Fig. 10. Comparison of last floor drift before and after improvement under ETA20e02 record

در نظر گرفته می‌شود تا بتواند روند افزایشی خود را حفظ کند همچنین برای رفع پله‌ای بودن آن با استفاده از روش میانگین‌گیری متوسط^{۱۱} این منحنی‌ها هموارسازی می‌شوند. در شکل ۱۱ منحنی زمان دوام برای سازه در حالت قبل و بعد از به‌سازی با در نظر گرفتن پارامتر جابجایی نسبی طبقات ترسیم شده و سپس نتایج آن با حدود مجاز آیین نامه مقایسه می‌گردد. که بر اساس آیین نامه ASCE41-17 مقادیر مجاز جابجایی نسبی سازه برای سطح CP برابر ۰.۵٪، برای سطح LS برابر ۲.۵٪ و برای سطح IO برابر ۰.۷٪ در نظر گرفته شده است. بنابراین سازه می‌بایستی در سطح خطر BSE-2 سطح عملکردی CP و در سطح خطر BSE-1 سطح LS را ارضا کند

۳٪، $m_0 = ۷$ و $\xi = ۱$ مدل‌سازی شده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب حداکثر جابجایی طبقه آخر تحت رکورد زلزله Northridge و تابع شتاب ETA20e02 ترسیم شده، که نتایج نشان می‌دهد اضافه کردن میراگر جرمی فعال، جابجایی حداکثر طبقه آخر را بین ۵۰٪ تا ۴۰٪ کاهش داده است.

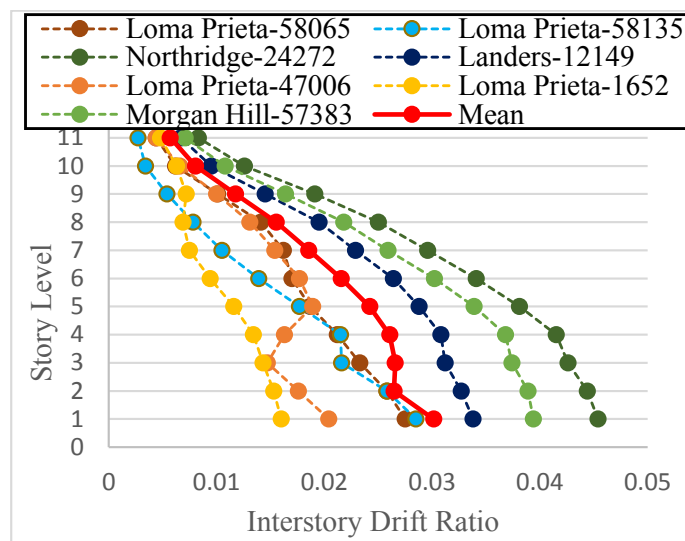
نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل روش زمان دوام معمولاً به کمک منحنی افزایشی ارائه می‌شود در این منحنی محور افقی زمان و محور قائم آن حداکثر پاسخ سازه به ازای پارامترهای تقاضای مختلف می‌باشد. در این منحنی گاهی ممکن است در یک بازه زمانی، پاسخ حداکثر از مقادیر پاسخ‌های قبلی کمتر باشد از این رو برای منحنی در آن بازه، یک مقدار ثابت

1 Moving average



شکل ۱۱. منحنی عملکرد سازه ۱۱ طبقه قبل و بعد از بهسازی

Fig. 11. Performance curve of the 11-story

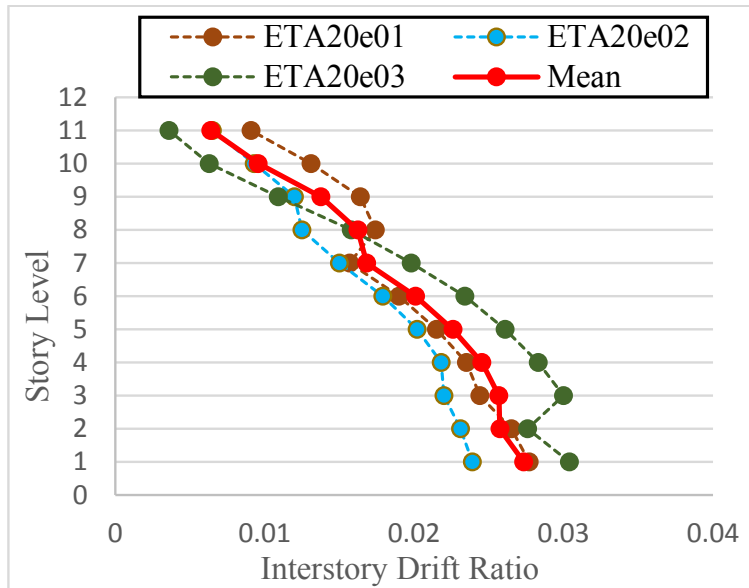


شکل ۱۲. جابجایی نسبی طبقات تحت مجموعه GM1

Fig. 12. Displacement of floors under the GM1 set

می‌شود که جابجایی نسبی حداکثر تحت رکورد Northridge در مجموعه GM1 در طبقه اول است، همچنین جابه‌جایی نسبی سازه به طور کلی یک روند نزولی داشته است که همین نتایج نیز در بررسی توابع سری e مشاهده می‌گردد. پس می‌توان گفت، که توابع زمان دوام پیش بینی مناسبی از رفتار سازه تحت رکوردهای زلزله ارائه کرده است.

[۱۷]. طبق نتایج به دست آمده از شکل ۱۱، سازه قبل از بهسازی، عملکرد ضعیفی داشته اما با افزودن میراگر جرمی فعال در طبقه آخر، عملکرد سازه بهبود یافته و مدت زمان دوام سازه از (S) ۶/۳۱ به (S) ۹/۵۶ افزایش می‌یابد. در شکل ۱۲ و ۱۳ با مقایسه بین جابجایی نسبی طبقات تحت مجموعه GM1 و توابع شتاب زمان دوام سری ETA20e01-03 مشاهده



شکل ۱۳. جابجایی نسبی طبقات تحت توابع شتاب زمان دوام

Fig. 13. Displacement of floors under endurance time acceleration functions (ETAf)

۱۰- نتیجه گیری

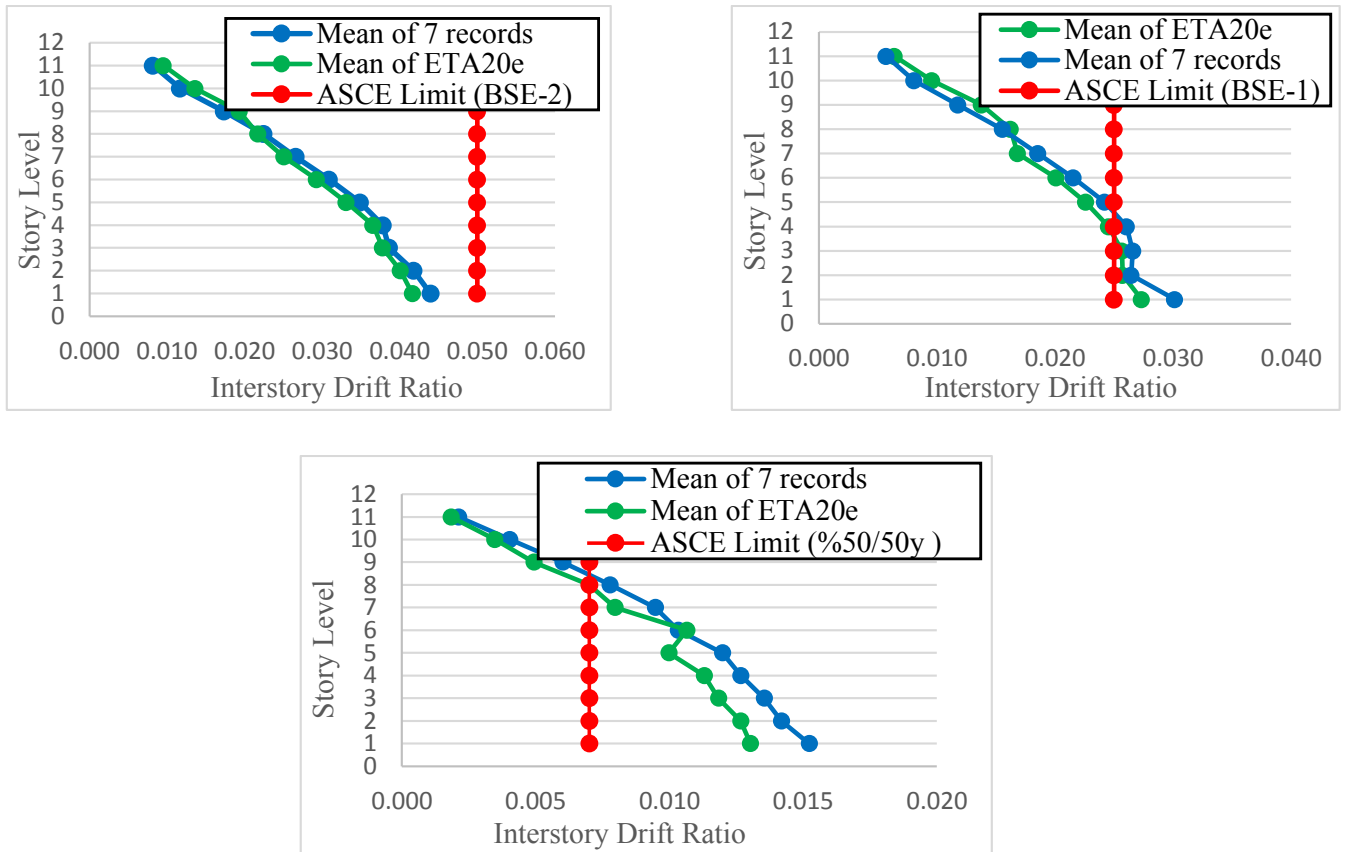
در این پژوهش هدف، بررسی کارایی سیستم کنترلی میراگر جرمی فعال (ATMD) با استفاده از روش زمان دوام در مقایسه با روش تاریخچه زمانی است. برای تحلیل عددی و ارزیابی از یک سازه یازده طبقه مجهز به میراگر تنظیم شونده فعال با کنترل گر فازی بهینه که در طبقه آخر قرار گرفته، استفاده شده است. پارامترهای $m_0 = 3\%$ ، $\xi = 7\%$ و $\beta = 1$ در مدل سازی میراگر با توجه به تحقیقات پیشین استفاده شده است. نتایج نشان می دهد، روش زمان دوام بر اساس نسل ششم توابع زمان دوام به خوبی و با زمان کمتر می تواند نتایج تحلیل های تاریخچه زمانی را شبیه سازی کند. که با توجه به نمودارهای ارائه شده، می توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱- در سازه مجهز به میراگر جرمی فعال حداکثر طبقه آخر بین 4% تا 5% کاهش می یابد همچنین باعث کاهش جابجایی نسبی بین طبقات شده و حدود مجاز حداکثر که در آیین نامه نیز تعیین شده رعایت می گردد.

۲- با استفاده از منحنی زمان دوام در حالت قبل و بعد از به سازی می توان نتیجه گرفت، که سازه مجهز شده به میراگر جرمی تنظیم شونده

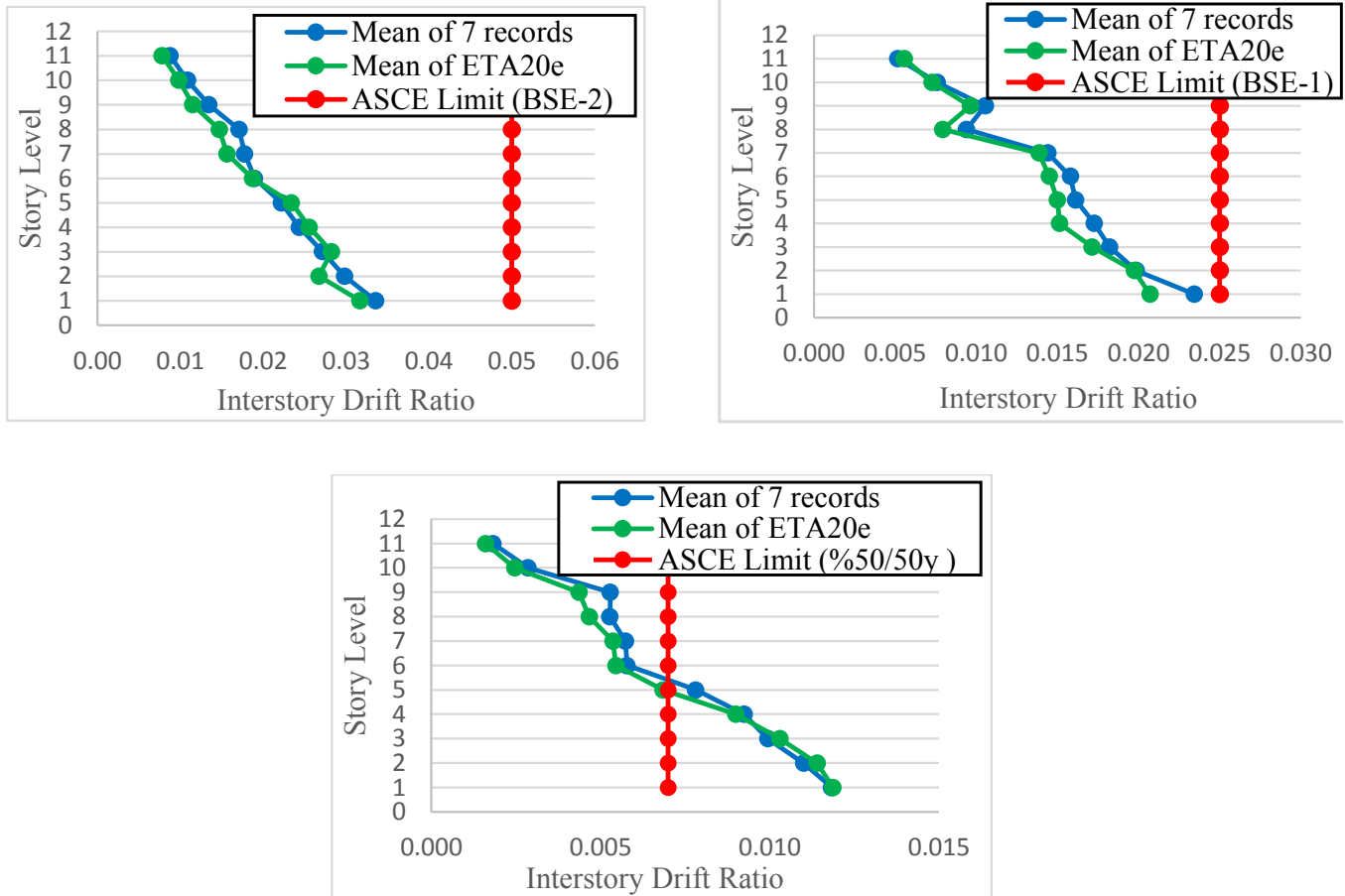
طبق شکل های ۱۴ و ۱۵ برای ارزیابی بهتر عملکرد میراگر جرمی فعال در کاهش پاسخ لرزه ای سازه با استفاده از روش زمان دوام، مقایسه ای بین جابجایی نسبی طبقات در حالت قبل و بعد از به سازی برای سطوح خطر BSE-1، BSE-2 و $50/750\%$ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می شود سازه قبل از به سازی عملکردی نزدیک به حدود آیین و حتی فراتر از آن داشته است اما پس از به سازی عملکرد سازه بهبود یافته و مقادیر جابجایی نسبی بین طبقات روند کاهشی داشته به طور مثال، در سطح خطر BSE-1 حداکثر جابجایی نسبی سازه به میزان 24% کاهش یافته است که نشان دهنده کارایی مناسب میراگر جرمی فعال می باشد، علاوه بر این، روند تغییرات جابجایی با استفاده از توابع زمان دوام با پاسخ سازه ناشی از میانگین هفت رکورد سری GM1 مشابه است.

در مقایسه روش زمان دوام با روش تاریخچه زمانی در شکل ۱۴ و ۱۵ می توان خطای ناشی از روش زمان دوام در پیش بینی جابجایی نسبی طبقات در سطوح خطر مختلف را طبق جدول ۸ مشاهده کرد که با توجه به آن، بین این دو روش برای حالت قبل از به سازی خطای 17.4% و بعد از به سازی خطای 18% درصدی وجود دارد.



شکل ۱۴. جابجایی بین طبقات تحت تابع شتاب زمان - دوام و متوسط ۷ رکورد در سطح خطر BSE-1 و BSE-2 در سازه قبل از بهسازی

Fig. 14. Drift between floors under the endurance time acceleration functions (ETAfEs) and average 7 records at the BSE-1 and BSE-2 risk levels in the structure before the improvement.



شکل ۱۵. جابجایی بین طبقات تحت تابع شتاب زمان - دوام و متوسط ۷ رکورد در سطح خطر مختلف در سازه پس از بهسازی با میراگر

Fig. 15. Drift between floors under the endurance time acceleration functions (ETAFs) and average 7 records at different risk levels in the structure after improvement with damper

جدول ۸. درصد خطای نتایج آنالیز زمان دوام نسبت به نتایج حاصل از زلزله واقعی برای جابجایی نسبی طبقات

Table 8. Error percentage of results of endurance time analysis compared to real earthquake results for relative floor drift

سطح خطر	%50/50year		BSE-1		BSE-2	
	درصدخطا قبل از بهسازی	درصدخطا بعد از بهسازی	درصدخطا قبل از بهسازی	درصد خطا بعد از بهسازی	درصدخطا قبل از بهسازی	درصدخطا بعد از بهسازی
۱	۰/۳	۱۴/۴	۹/۳	۱۱/۶	۵/۳۵	۵/۶۷
۲	۳/۵	۱۰/۷	۲/۷	۰/۶	۴/۰۹	۱۰/۳۳
۳	۳/۵	۱۲/۶	۳/۵	۵/۹	۲/۱۷	۳/۷۶
۴	۲/۶	۱۰/۸	۵/۸	۱۲/۴	۳/۳۸	۴/۷۳
۵	۱۲/۴	۱۶/۷	۶/۷	۷	۵/۰۷	۵/۱۳
۶	۵/۷	۳	۶/۸	۸/۲	۵/۲۰	۱/۲۸
۷	۶/۵	۱۵/۹	۹/۳	۳/۸	۵/۷۱	۱۲/۰۳
۸	۱۱/۶	۱۰/۱	۴/۳	۱۵/۶	۳/۴۷	۱۳/۸۹
۹	۱۷/۴	۱۸	۱۴/۵	۸/۸	۱۰/۲۷	۱۴/۴۵
۱۰	۱۳/۷	۱۳/۹	۱۵/۹	۴/۲	۱۴/۱۶	۹/۵۵
۱۱	۱۱/۸	۱۳/۳	۱۰/۹	۷/۱	۱۴/۰۶	۱۱/۰۷

صورت استفاده از میراگر جرمی فعال بهینه اشاره کرد

۱۱- فهرست علائم

β ضریب تنظیم

i فرکانس

ξ نسبت میرایی

m_0 درصد جرمی میراگر

f نیروی کنترل

منابع

- [1] J. Yao, Concept of structural control, Journal of the Structural Division, 98(st 7).(1972)

فعال در زمان $(S) 9/65$ ثانیه به حدود مجاز آیین نامه رسیده در صورتی که قبل از بهسازی این زمان $(S) 6/31$ ثانیه بوده است که این افزایش زمان دوام سازه نشان می‌دهد، استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده فعال عملکرد سازه را بهبود خواهد داد.

۳- روش زمان دوام از قابلیت پیش بینی رفتار سازه پیچیده با حداقل تعداد آنالیزها را برخوردار می‌باشد.

۴- که از مقایسه روند تغییرات نمودارهای پاسخ سازه تحت توابع سری e و هفت شتاب‌نگاشت انتخاب شده می‌توان نتیجه گرفت، پاسخ‌های ناشی از روش زمان دوام تخمین قابل قبولی از پاسخ‌های شتاب‌نگاشت واقعی ارائه داده و دارای خطای حداکثر ۱۸ درصدی است.

۵- به صورت کلی در مورد نتایج می‌توان به کاهش حداکثر در جابجایی طبقه آخر و به تاخیر انداختن رسیدن به حدود حداکثر دررفت آیین نامه در

- Tapered Steel Slit Dampers in Steel Structures Using the Endurance Time Method, *Structural and Environmental Engineering Computing*, Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, Paper 49, (2013).
- [13] A. Shirkhani, I.H. Mualla, N. Shabakhty, S.R. Mousavi, Behavior of steel frames with rotational friction dampers by endurance time method, *Journal of Constructional Steel Research*, 107 (2015) 211-222.
- [14] H. Riahi, H. Estekanchi, S.S. Boroujeni, Application of endurance time method in nonlinear seismic analysis of steel frames, *Procedia Engineering*, 14 (2011) 3237-3244.
- [15] MathWorks MATLAB. SIMULINK for technical computing; (2017).
- [16] H. Estekanchi, H. Vafai, Seismic analysis and design using the endurance time method, Volume II: Advanced topics and application, Momentum Press, (2018).
- [17] ASCE/SEI41-17, Seismic rehabilitation of existing buildings, American Society of Civil Engineers, (2017).
- [18] FEMA 356, Prestandard and commentary for the Seismic rehabilitation of buildings, Federal emergency management agency, (2000).
- [19] H. Estekanchi, A. Vafai, V. Valamanesh, A. Mirzaee, A. Nozari, A. Bazmuneh, Recent advances in seismic assessment of structures by Endurance Time Method, in: *Proceedings of a US–Iran–Turkey seismic workshop–seismic risk management in urban areas*, PEER, report, 2011, pp. 289-301.
- [20] M. Sarcheshmepour, H.E. Estekanchi, M.A. Ghannad, Optimum placement of supplementary viscous dampers for seismic rehabilitation of steel frames considering soil–structure interaction, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 29(1) (2020) e1682.22.
- [21] R.W. Clough, J. Penzien, *Dynamics of structures*, McGraw–HM, (1975).
- [22] X. Wang, D. Yun, Force feedback control method of active tuned mass damper, *Shock and Vibration*, (2017).
- [2] O. Akyürek, N. Suksawang, T.H. Go, Vibration control for torsionally irregular buildings by integrated control system, *Engineering Structures*, 201 (2019) 109775.
- [3] J.C. Chang, T.T. Soong, Structural control using active tuned mass dampers, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 106(6) (1980) 1091-1098.
- [4] S. Aizawa, Y. Fukao, S. Minewaki, Y. Hayamizu, H. Abe, N. Haniuda, An experimental study on the active mass damper, in: *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, 1988, pp. 871-876.
- [5] A. Farzampour, A.K. Asl, Performance of tuned mass dampers in vibration response control of base-excited structures, *Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering*, 2(3) (2017) 87-94.
- [6] A. Yanik, U. Aldemir, M. Bakioglu, A new active control performance index for vibration control of three-dimensional structures, *Engineering Structures*, 62 (2014) p-53-64.
- [7] B. Jiang, X. Wei, Y. Guo, Linear quadratic optimal control in active control of structural vibration systems, in: *2010 Chinese Control and Decision Conference*, IEEE, 2010, pp. 3546-3551.
- [8] O. Akyürek, N. Suksawang, T.H. Go, H. Tekeli, Performance evaluation of a reinforced concrete building strengthened respectively by the infill wall, active and passive tuned mass damper under seismic load, *Computers & Structures*, 223106097(2019).
- [9] S. Pourzeynali, H. Lavasani, A. Modarayi, Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms, *Engineering Structures*, 29(3) (2007) 346-357.
- [10] H.E. Estekanchi, H. Vafai, G. Ahmadi, M. Mashayekhi, M. Harati, S.A. Mirfarhadi, A state-of-knowledge review on the Endurance Time Method, arXiv preprint arXiv:1910.04759(2019).
- [11] H. Estekanchi, A. Vafaei, A.M. SADEGH, Endurance time method for seismic analysis and design of structures, *Scientia Iranica*, 11 (2004) 361-370.
- [12] A. Mirjalili, H.E. Estekanchi, M. Fakhri, Operation of

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Z. Samani, M. A. Shayanfar, M. R. Karbasi, *Investigating the Effect of Active Tuned Mass Damper on the Endurance Time Diagram of Tall Buildings*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(9) (2021) 3731-3750.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18083.6761



