

استفاده از میراگر جرمی با سختی غیرخطی نرم‌شونده و میرایی نیمه‌فعال

محمد خلیل خلیلی* (دانشجوی دکتری)

کریم بادامچی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۶ (۴۷-۵۴)
دوره ۲، شماره ۱، ص. ۴۷-۵۴

با پیشرفت علم و نیاز روزافزون به روش‌های نوین به منظور افزایش ضریب ایمنی همراه با کاهش هزینه‌های ساخت و ساز، برخی از پژوهشگران سعی کرده‌اند تا میراگرها و روش‌های کنترلی را به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در جهت کاهش جابه‌جایی و شتاب طبقات ساختمان به کار گیرند. در این نوشتار برای کاهش جابه‌جایی طبقات ساختمان، از میراگر جرمی با سختی نرم‌شونده‌ی غیرخطی به همراه میرایی نیمه‌فعال با کنترل‌کننده‌ی فازی استفاده شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی قادر است بیشینه‌ی جابه‌جایی طبقات ساختمان را حدود ۲۶٪ نسبت به حالت سازه با میراگر جرمی غیرفعال و حدود ۳۴٪ نسبت به حالت سازه‌ی بدون میراگر کاهش دهد. همچنین با مقایسه‌ی RMS جابه‌جایی و شتاب طبقات در حالات مختلف مشاهده می‌شود که پارامترهای مذکور در حالت با میراگر پیشنهادی نیز کاهش پیدا می‌کند.

واژگان کلیدی: میراگر جرمی، کنترل‌کننده‌ی فازی، میراگر نیمه‌فعال، سختی غیرخطی.

khalili@tabrizu.ac.ir
k.badamchi@tabrizu.ac.ir

۱. مقدمه

درون مثنی‌های هیستریزس بیشتر شود و در نتیجه انرژی ورودی بیشتری مستهلک شود. در این نوشتار یک میراگر جرمی با سختی نرم‌شونده برای رسیدن به این هدف مورد استفاده قرار گرفته است.

۲. میراگر جرمی

در میراگر جرمی غیرفعال، اتلاف انرژی بدون در نظر گرفتن نیروهای وارد بر سازه و پاسخ سازه انجام می‌شود، که روابط مناسبی برای تعیین پارامترهای آن ارائه شده است.^[۱] در میراگر جرمی نیمه‌فعال هنگام وقوع یک زمین‌لرزه یا طوفان، حس‌گرهای نصب‌شده بر روی سازه، مشخصات این تحریکات و پاسخ‌های سازه را ثبت و به پردازشگر منتقل می‌کنند.^[۱۲، ۱۳] در شکل ۱، المان‌های یک سیستم کنترلی و نحوه‌ی ارتباط بین آنها نشان داده شده است.

در پژوهش حاضر، یک میراگر جرمی با سختی غیرخطی نرم‌شونده با میرایی نیمه‌فعال پیشنهاد و در ادامه، یکی از روش‌های تئوری ایجاد میراگر مذکور توضیح داده شده است.

هرگاه سیستم نشان داده‌شده در شکل ۲ تحت تأثیر بار قائم به کشش بیافتد، این سیستم نرم‌شونده و چنانچه در حالت فشاری باشد، سخت‌شونده می‌شود. از این موضوع می‌توان برای ایجاد میراگر با سختی غیرخطی نرم‌شونده استفاده کرد. بنابراین برای ایجاد میراگر پیشنهادی می‌توان از شکل ۳ استفاده کرد.

میراگر جرمی از یک جرم با سختی و میرایی تشکیل شده است، که اگر سختی و میرایی میراگر نسبت به زمان تغییر نکند به آن میراگر جرمی غیرفعال^۱ گفته می‌شود. چنانچه این پارامترها بتوانند نسبت به زمان تغییر کنند، در این صورت میراگر جرمی نیمه‌فعال^۲ به وجود می‌آید. میراگر جرمی فعال^۳ مانند یک میراگر جرمی غیرفعال است، اما با این تفاوت که در هر لحظه از زمان می‌تواند یک نیروی خارجی به سیستم سازه وارد کند. میراگرهای جرمی ترکیبی^۴ از ترکیب میراگرهای ذکرشده به وجود می‌آیند. امروزه ساختمان‌های بلندمرتبه‌ی زیادی وجود دارد که در آنها از میراگر جرمی استفاده شده است.^[۱] همچنین تأثیر مطلوب میراگرهای جرمی به اثبات رسیده است.^[۲-۴]

در میراگر جرمی نیمه‌فعال کنترل‌کننده برای تعیین پارامترهای مناسب سیستم در هر لحظه به کار می‌رود، که این کار با استفاده از الگوریتم‌های کنترلی انجام می‌شود. در واقع کنترل فرایندی است که در طی آن با دستکاری کردن پارامترهای مؤثر یک سیستم دینامیکی، عملکردی مطلوب از آن سیستم به دست می‌آید.^[۵] یکی از الگوریتم‌های مناسب برای نیل به این هدف، به کارگیری منطق فازی است.^[۶-۸] پژوهش‌های زیادی وجود دارد که نشان می‌دهد کنترلر فازی باعث ایجاد عملکردی مطلوب در میراگرهای جرمی می‌شود.^[۹]

یکی از راهکارهایی که دانشمندان برای افزایش استهلاک انرژی زلزله استفاده می‌کنند، افزایش شکل‌پذیری است.^[۱۰] افزایش شکل‌پذیری باعث می‌شود تا سطح

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۴/۴/۲۳، پذیرش ۱۳۹۴/۵/۲۴.

۳. معادلات به کاررفته و کنترل کننده ی فازی

یکی از روش های حل معادلات سازه، استفاده از فضای حالت است، که باعث می شود مدل سازی سازه با میراگر جرمی ساده تر شود. چنانچه $[M]$ ماتریس جرم سازه، $[K]$ ماتریس سختی سازه، و $[C]$ ماتریس میرایی سازه باشد، آنگاه معادلات سازه در فضای حالت به صورت رابطه ی ۲ نوشته می شود:

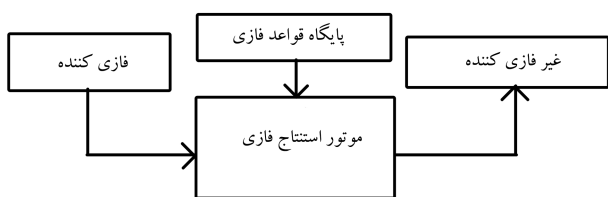
$$\begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{u} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} O_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} O_{n \times n} \\ I_{n \times n} \end{bmatrix} \{r\} \ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

که در آن، n تعداد درجات آزادی سیستم، I ماتریس واحد، O ماتریس صفر، \ddot{u}_g شتاب زلزله و $\{r\}$ بردار ضریب تأثیر است. حال نیاز به دانستن میرایی و سختی میراگر است، تا بتوان این معادلات را کامل و حل کرد. در ادامه ی این بخش، چگونگی یافتن میرایی توسط کنترل فازی و سختی توسط روش اولر بیان شده است.

یک مجموعه ی فازی، تعمیم یک مجموعه ی کلاسیک است که اجازه می دهد تابع تعلق هر مقداری را در بازه ی $[0, 1]$ اختیار کند. به عبارت دیگر، یک مجموعه ی کلاسیک فقط می تواند دو مقدار ۰ و ۱ داشته باشد، در حالی که تابع تعلق یک مجموعه ی فازی، یک تابع پیوسته در محدوده ی $[0, 1]$ است. کنترل فازی از ۴ قسمت تشکیل شده است، که ساختار اصلی سیستم های فازی در شکل ۵ نشان داده شده است.

در قسمت فازی کننده، جابه جایی و سرعت طبقه ی آخر با استفاده از توابع عضویت نشان داده شده در شکل ۶ به مجموعه ی فازی تبدیل می شوند و با توجه به توابع عضویت شکل ۷، میرایی در سیستم فازی تعیین می شود. ورودی فازی جابه جایی، ۶ تابع عضویت؛ ورودی فازی سرعت، ۴ تابع عضویت؛ و خروجی فازی میرایی، نیز ۶ تابع عضویت دارد.

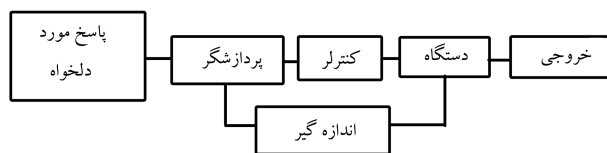
پایگاه قواعد فازی از مجموعه یی از قواعد اگر - آنگاه تشکیل شده است، که در جدول ۱ ارائه شده است. این قوانین براساس نیروی میرایی مورد نیاز میراگر و با توجه به جابه جایی و سرعت طبقه ی آخر شکل گرفته اند.



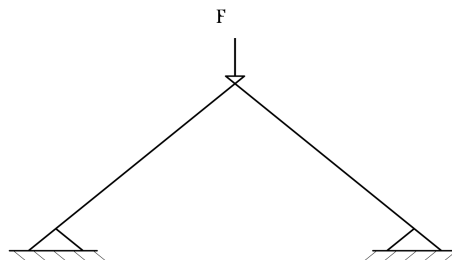
شکل ۵. ساختار اصلی سیستم های فازی.

جدول ۱. قوانین اگر - آنگاه فازی.

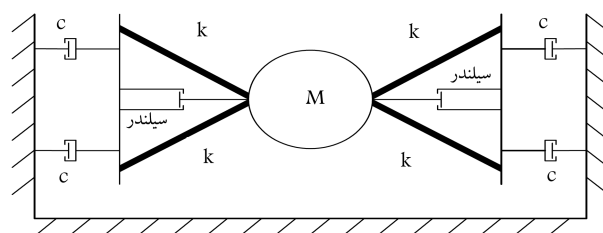
سرعت	جابه جایی					
	LP	MP	SP	SN	MN	LN
M	S	VS	L	VL	EL	N
M	S	VS	M	L	VL	ZN
VL	L	M	VS	S	M	ZP
EL	VL	L	VS	S	M	P



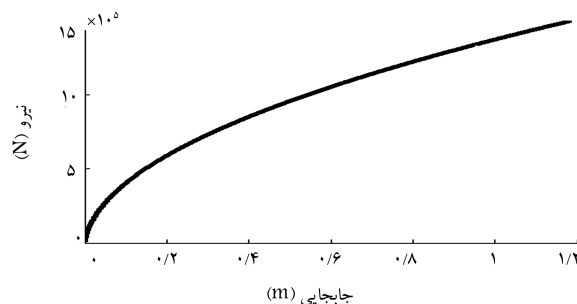
شکل ۱. المان های سیستم های کنترلی.



شکل ۲. سیستم با سختی نرم شونده و سخت شونده.



شکل ۳. شکلی شماتیک از سیستم پیشنهادی.



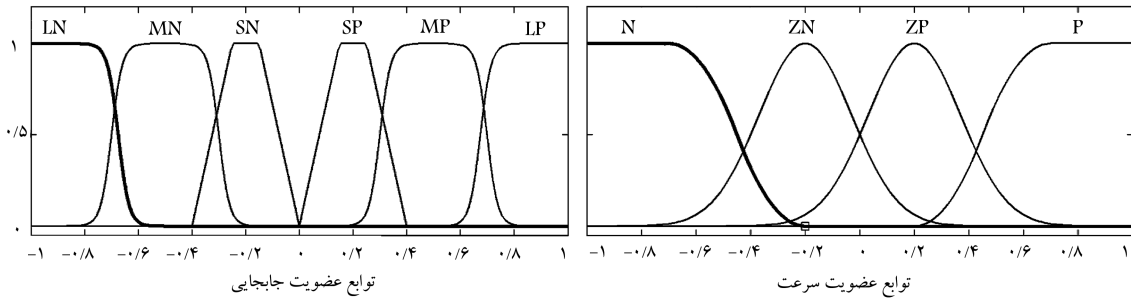
شکل ۴. منحنی نیرو جابه جایی میراگر غیرخطی.

همان طور که در شکل مذکور مشاهده می شود، جرم میراگر (M) در میانه ی سیستم قرار می گیرد و برای آنکه سختی های موجود (k) در حالت نرم شونده باشند، از ۲ سیلندر در طرفین استفاده می شود تا اجازه ندهند این سختی ها به کشش بیاقتند. همچنین برای ایجاد میرایی نیمه فعال (c) می توان از میراگرهای MR ۵ یا ER ۶ استفاده کرد، که با استفاده از کنترل کننده می توان در هر لحظه، میرایی مناسب را به این میراگرها اعلام کرد تا میرایی مورد نظر را به سازه اعمال کنند.

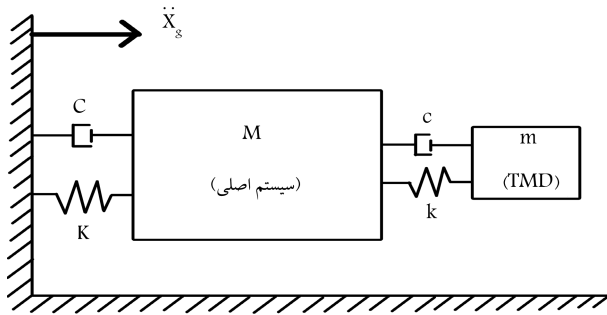
برای سختی میراگر، رابطه ی ۱ استفاده شده است، که در آن F بر حسب مگانیوتن، K بر حسب نیوتن بر متر و مقدار ضریب بی بعد A ، براساس برخی پژوهش ها، $[13, 11]$ برابر $10^6 \times 185$ در نظر گرفته شده است.

$$K = \frac{A}{2 \cdot F + 1} \quad (1)$$

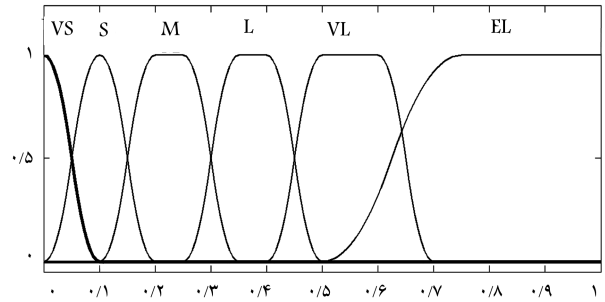
نمودار نیرو - جابه جایی برای این میراگر به صورت شکل ۴ است، که با استفاده از روش اولر و در نرم افزار MATLAB ترسیم شده است.



شکل ۶. توابع عضویت سرعت و جابه‌جایی.



شکل ۸. سیستم دو درجه آزادی.



شکل ۷. توابع عضویت خروجی.

برای مثال، یکی از این قوانین اگر - آنگاه مورد استفاده به این صورت است:

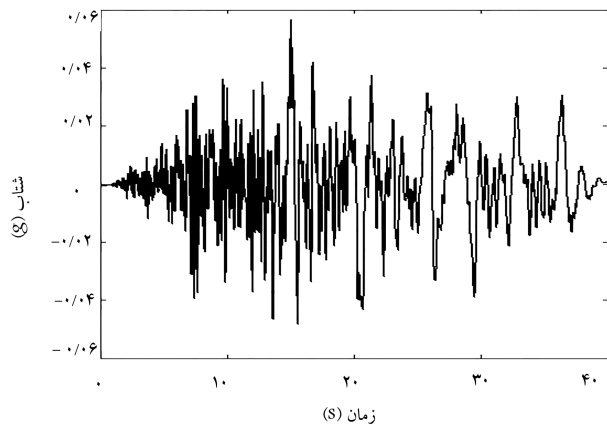
IF Displacement is LN and Velocity is N, Then Damping is EL.

با توجه به شکل ۵، موتور استنتاج فازی باید براساس قوانین موجود در پایگاه قواعد فازی و فازی‌کننده، خروجی را به صورت فازی نشان دهد. به عبارت دیگر، استنتاج فازی، فرایند فرموله‌کردن نگاشت ورودی داده شده به یک خروجی با استفاده از منطق فازی است. برای هر چه بهتر عمل‌کردن کنترلر پیشنهادی، موتور استنتاج کمینه استفاده می‌شود. در این روش از عملگر کمینه برای t - نرم‌ها (روش And)، از عملگر بیشینه برای s - نرم‌ها (روش Or)، از استلزام کمینه‌ی ممدانی برای دلالت‌کردن^۷ و از بیشینه برای استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه با ترکیب اجتماع^۸ استفاده می‌شود. ورودی هر فرایند غیرفازی ساز، یک مجموعه‌ی فازی به‌دست‌آمده از موتور استنتاج فازی است و خروجی آن یک عدد است که غیرفازی ساز این فرایند را انجام می‌دهد. برای کنترلر طراحی شده از روش مرکز ثقل استفاده شده است.

برای تعیین محل میراگر در هر لحظه از زمان، از روش اولر استفاده شده است. در این روش نیروی هدف به n قسمت تقسیم شده و سپس سختی سازه با توجه به جزء نیروی موردنظر در هر مرحله به‌دست آمده است. جابه‌جایی در هر مرحله از تقسیم جزء نیرو بر سختی آن لحظه به‌دست می‌آید. جابه‌جایی کل در هر مرحله از حاصل جمع جابه‌جایی به‌دست‌آمده با جابه‌جایی مرحله‌ی قبل است. این حلقه تکرار می‌شود. قابل ذکر است که هر چه n بیشتر باشد، دقت موردنظر بیشتر می‌شود.

۴. مدل تحلیلی مورد مطالعه

در ابتدا یک سیستم دو درجه آزادی با مشخصات نشان داده‌شده در شکل ۸ مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۹. نمودار تاریخچه‌ی زمانی زلزله‌ی بورگو.

در این سیستم جرم اصلی، دوره‌ی تناوب 0.725 s و نسبت میرایی 0.02 دارد و نسبت جرم و بسامد میراگر به جرم و بسامد سیستم اصلی به ترتیب 0.1 و 0.9036 است. همچنین نسبت میرایی TMD، 0.3196 است. این سیستم در حالت کنترل نشده و کنترل غیرفعال در سال ۱۹۹۷^[۱۱] مورد مطالعه قرار گرفته است.

سپس سیستم ذکر شده تحت زلزله‌ی بورگو^۹ با نمودارهای تاریخچه‌ی زمانی نشان داده‌شده در شکل ۹ قرار گرفته است.

نتایج به‌دست‌آمده از کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی و گزارش‌های ساداک و همکارانش^[۱۱] در جدول ۲ ارائه شده است.

جهت مطالعه‌ی ساختمانی، یک ساختمان ۱۰ طبقه‌ی فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات این ساختمان در جدول ۳ ارائه شده است. میرایی سازه را می‌توان از میرایی رایلی مطابق روابط ۳ و ۴ به‌دست آورد:

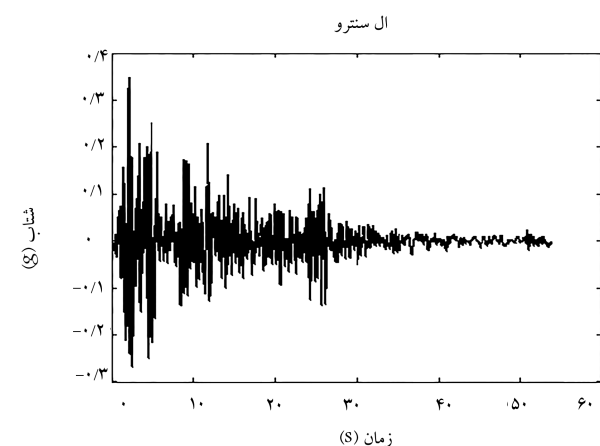
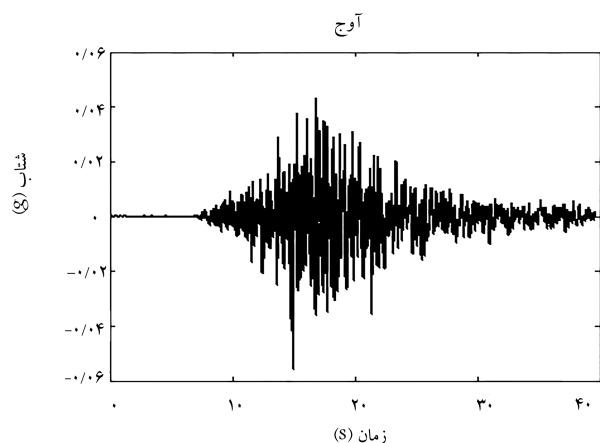
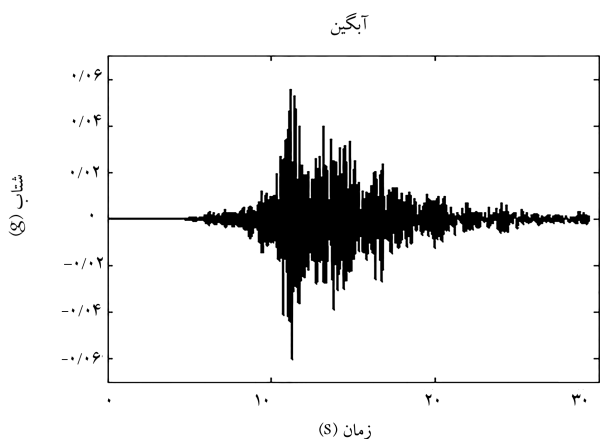
جدول ۲. بیشینه‌ی جابه‌جایی جرم اصلی.

میراگر پیشنهادی	میراگر جرمی با سختی خطی	بدون میراگر
(mm)	(mm)	(mm)
۲٫۳	۲٫۴	۴٫۳
—	۲٫۴	۴٫۳

پژوهش ساداک و همکاران^[۱۱] پژوهش حاضر

جدول ۳. مشخصات ساختمان ۱۰ طبقه‌ی مورد مطالعه.

شماره‌ی طبقات	جرم طبقه (KN.s/m)	سختی طبقه (MN/m)
۱	۲۱۵	۴۶۸
۲	۲۰۱	۴۷۶
۳	۲۰۱	۴۶۸
۴	۲۰۰	۴۵۰
۵	۲۰۱	۴۵۰
۶	۲۰۱	۴۵۰
۷	۲۰۱	۴۵۰
۸	۲۰۳	۴۳۷
۹	۲۰۳	۴۳۷
۱۰	۲۰۳	۴۳۷



شکل ۱۰. نمودار تاریخچه‌ی زمانی زلزله‌های آبگین، آوج و ال سنترو.

توانسته است جابه‌جایی‌های طبقه‌ی آخر سازه را به میزان مطلوبی کاهش دهد و این کاهش نسبت به میراگر غیرفعال بیشتر بوده است. برای مثال در زلزله‌ی ال سنترو، بیشینه‌ی جابه‌جایی‌های طبقه‌ی آخر ساختمان در حالت بدون میراگر، با میراگر دارای سختی ثابت و همراه با میراگر پیشنهادی به ترتیب ۱٫۴، ۱٫۳ و ۰٫۸ میلی‌متر است. به عبارت دیگر، میراگر پیشنهادی حدود ۴۳٪ جابه‌جایی طبقه‌ی آخر را نسبت به حالت سازه‌ی بدون میراگر و حدود ۳۸٪ نسبت به میراگر با سختی ثابت کاهش داده است.

در جدول‌های ۴ الی ۶، بیشینه‌ی جابه‌جایی طبقات، RMS جابه‌جایی طبقات،

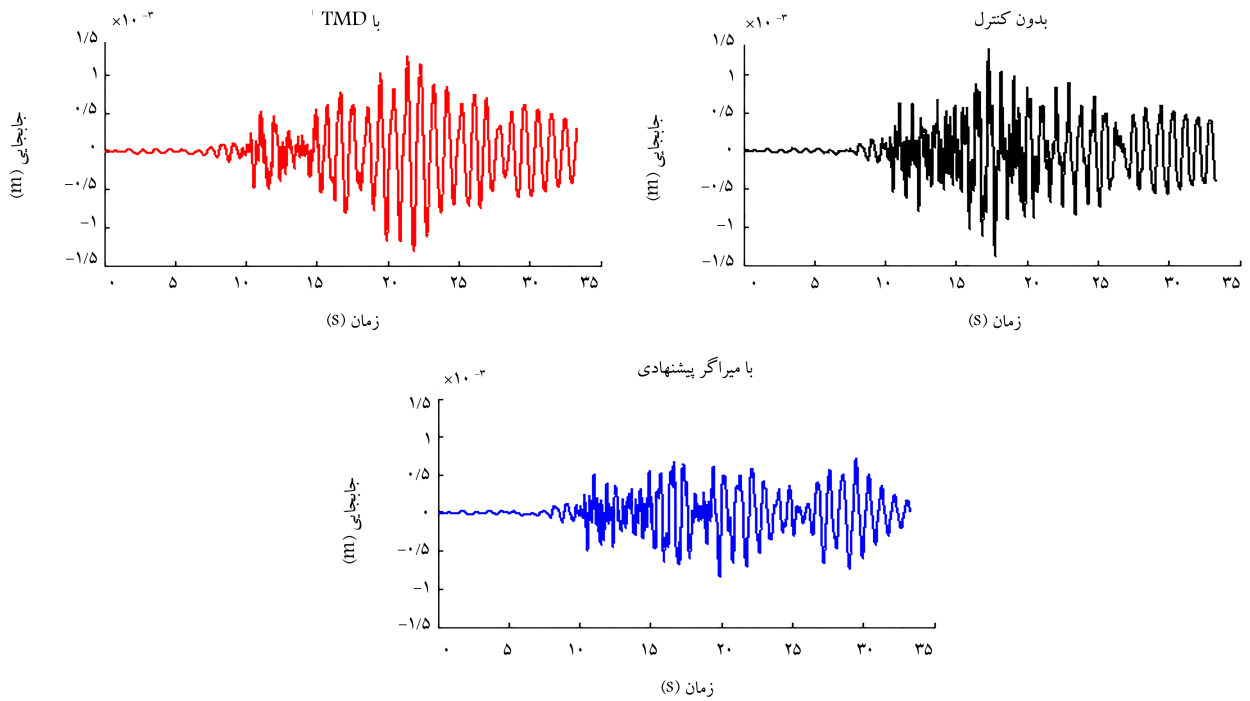
$$[C] = a_0 [M] + b_0 [K] \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix} = \frac{\zeta \omega_n \omega_m}{\omega_n + \omega_m} \begin{Bmatrix} \omega_n \omega_m \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

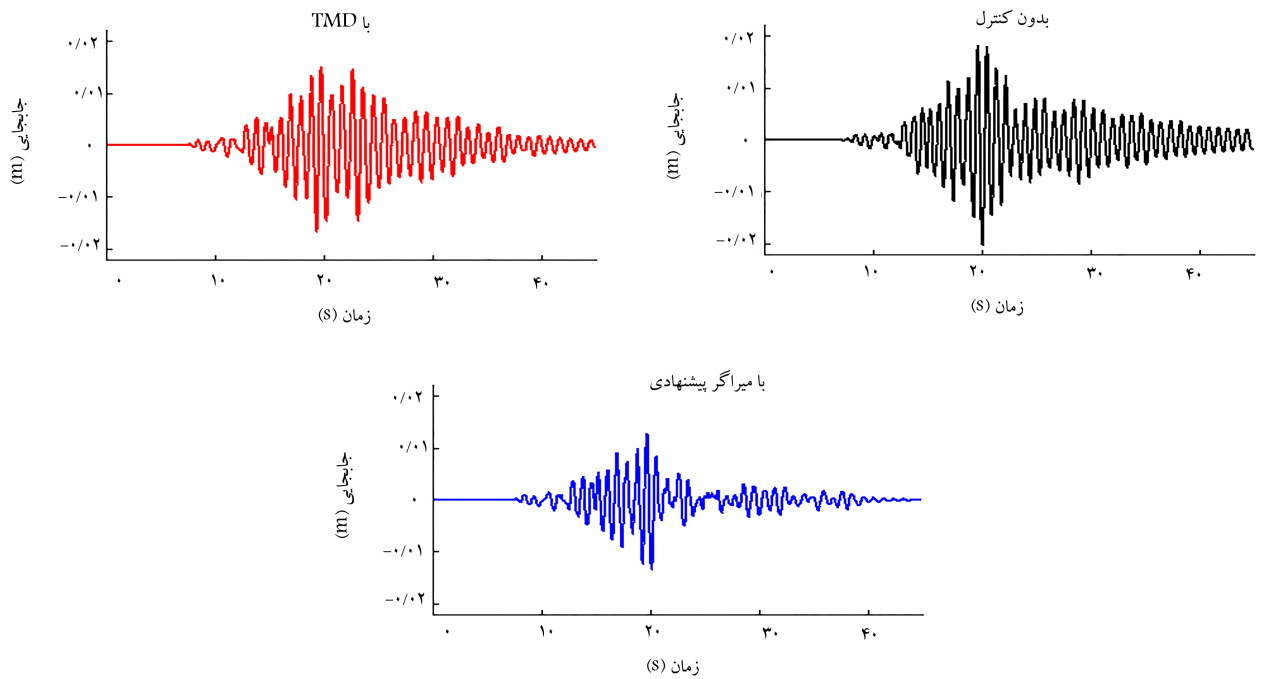
که در آن، ζ درصد میرایی سازه، ω_n و ω_m بسامدهای طبیعی سازه هستند. برای ساختمان ۱۰ طبقه‌ی مذکور، نسبت میرایی ۱٪ و برای یافتن a و b مودهای اول و دوم استفاده شده است.

جرم و بیشینه‌ی میرایی میراگر به ترتیب ۱۷۶ (KN.s/m) و ۱ (N.s/m) در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار سختی در میراگر با سختی خطی ۱۸۵ (MN/m) و در میراگر با سختی غیرخطی مطابق رابطه‌ی ۱ در نظر گرفته شده است.

برای بررسی میراگر ذکرشده، سازه تحت ۳ زلزله‌ی آبگین، آوج، و ال سنترو^{۱۰} با نمودارهای تاریخچه‌ی زمانی شتاب نشان داده شده در شکل ۱۰ قرار گرفته است. مدل‌سازی‌های مذکور در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. در شکل‌های ۱۱ الی ۱۳ جابه‌جایی طبقه‌ی دهم تحت زلزله‌های مذکور در ۳ حالت سازه‌ی بدون میراگر، سازه با میراگر دارای سختی ثابت، و سازه با میراگر دارای سختی غیرخطی و میرایی نیمه‌فعال نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های ۱۱ الی ۱۳ مشاهده می‌شود که میراگر جرمی پیشنهادی



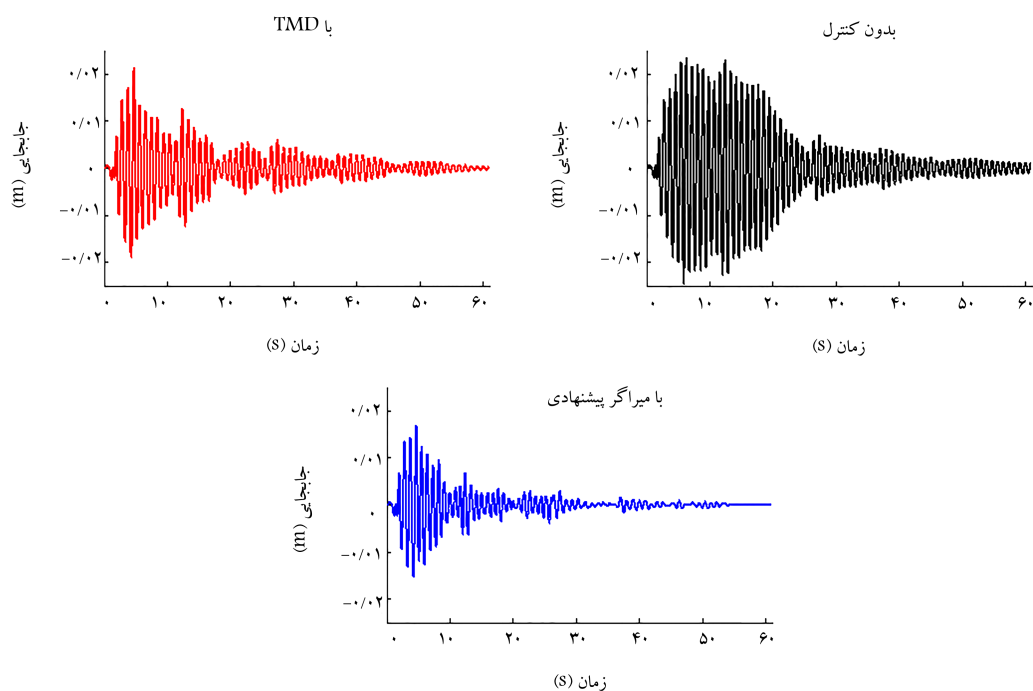
شکل ۱۱. جابه‌جایی طبقه‌ی آخر تحت زلزله‌ی آبگین.



شکل ۱۲. جابه‌جایی طبقه‌ی آخر تحت زلزله‌ی آوج.

پیشنهادی این پارامتر را تقریباً به نصف کاهش داده است. این امر باعث کاهش احتمال خستگی در اعضاء سازه و کاهش ترس ناشی از زلزله در ساکنان ساختمان می‌شود. البته باید توجه شود که میراگر غیرفعال نیز در مابقی موارد RMS جابه‌جایی طبقات را کاهش داده است. RMS شتاب طبقات نیز توسط میراگرها کاهش پیدا کرده است، اما در بعضی از موارد مشاهده می‌شود که میراگر با سختی ثابت نسبت به میراگر پیشنهادی بهتر عمل کرده است.

RMS شتاب طبقات در طی زلزله‌های مذکور ارائه شده است. همان‌طور که در جدول‌های مذکور مشاهده می‌شود، میراگر جرمی باعث کاهش جابه‌جایی بیشینه‌ی طبقات شده است، البته این کاهش جابه‌جایی با استفاده از میراگر پیشنهادی مطلوب‌تر بوده است. با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که RMS جابه‌جایی ساختمان با میراگر دارای سختی ثابت نسبت به ساختمان بدون میراگر بیشتر شده است. اما میراگر



شکل ۱۳. جابه‌جایی طبقه‌ی آخر تحت زلزله‌ی ال سنترو.

جدول ۴. پاسخ سازه تحت زلزله‌ی آبگین.

شماره‌ی طبقات										نوع میراگر	پاسخ سازه
۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۱,۳۸	۱,۲۷	۱,۰۷	۰,۸۶	۰,۹۲	۱,۰۳	۱,۰۱	۰,۸۷	۰,۶۶	۰,۴۰	بدون میراگر	بیشینه اندازه‌ی جابه‌جایی (mm)
۱,۳۲	۱,۲۵	۱,۱۵	۱,۰۴	۰,۹۳	۰,۸۱	۰,۶۹	۰,۵۵	۰,۴۲	۰,۲۷	میراگر با سختی ثابت	
۰,۸۴	۰,۷۹	۰,۷۴	۰,۷۲	۰,۷۲	۰,۶۸	۰,۶۰	۰,۵۳	۰,۵۲	۰,۳۵	میراگر پیشنهادی	
۰,۱۲	۰,۱۰	۰,۰۸	۰,۰۷	۰,۰۶	۰,۰۶	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۱	بدون میراگر	RMS جابه‌جایی (m)
۰,۱۵	۰,۱۴	۰,۱۲	۰,۱۰	۰,۰۸	۰,۰۶	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۱	۰,۰۰	میراگر با سختی ثابت	
۰,۰۶	۰,۰۶	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۰	میراگر پیشنهادی	
۲۲,۵۸	۹,۸۵	۱۶,۶۶	۱۲,۹۶	۲۱,۵۱	۱۱,۴۹	۱۶,۲۶	۱۹,۳۲	۲۳,۶۶	۱۹,۹۸	بدون میراگر	RMS شتاب (mm/s ²)
۹,۴۹	۵,۵۵	۸,۸۶	۱۲,۶۴	۱۴,۲۴	۵,۴۸	۷,۴۳	۱۲,۰۴	۱۸,۳۶	۱۲,۳۹	میراگر با سختی ثابت	
۱۴,۴۰	۶,۳۲	۱۲,۴۲	۱۱,۷۲	۱۶,۹۶	۷,۱۱	۹,۸۸	۱۳,۷۷	۱۹,۰۴	۱۵,۵۵	میراگر پیشنهادی	

جدول ۵. پاسخ سازه تحت زلزله‌ی آوج.

شماره‌ی طبقات										نوع میراگر	پاسخ سازه
۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۲۰,۲۵	۱۹,۸۹	۱۹,۱۶	۱۷,۹۰	۱۶,۱۶	۱۳,۹۸	۱۱,۴۶	۸,۷۳	۵,۹۵	۳,۰۶	بدون میراگر	بیشینه اندازه‌ی جابه‌جایی (mm)
۱۶,۶۵	۱۵,۹۲	۱۴,۸۳	۱۳,۴۶	۱۲,۰۵	۱۰,۵۹	۸,۸۳	۶,۸۶	۴,۷۳	۲,۴۵	میراگر با سختی ثابت	
۱۳,۳۶	۱۲,۸۲	۱۱,۹۹	۱۰,۹۵	۹,۸۴	۸,۵۹	۷,۱۶	۵,۶۷	۴,۰۲	۲,۱۲	میراگر پیشنهادی	
۲۰,۳۱	۱۹,۳۱	۱۷,۴۵	۱۴,۹۴	۱۲,۱۱	۹,۱۲	۶,۲۲	۳,۶۵	۱,۷۰	۰,۴۵	بدون میراگر	RMS جابه‌جایی (m)
۱۸,۵۸	۱۷,۱۸	۱۵,۱۹	۱۲,۷۷	۱۰,۱۹	۷,۵۷	۵,۱۰	۲,۹۵	۱,۳۶	۰,۳۵	میراگر با سختی ثابت	
۶,۴۱	۶,۰۰	۵,۳۵	۴,۵۳	۳,۶۴	۲,۷۳	۱,۸۷	۱,۱۰	۰,۵۲	۰,۱۴	میراگر پیشنهادی	
۹۵,۸۶	۷۴,۵۰	۶۱,۶۹	۵۸,۲۲	۵۶,۵۳	۵۰,۸۸	۴۶,۵۸	۴۲,۷۱	۳۲,۸۳	۱۳,۴۰	بدون میراگر	RMS شتاب (mm/s ²)
۵۳,۸۵	۴۳,۶۰	۳۹,۸۴	۳۹,۲۶	۳۷,۴۸	۳۳,۰۴	۲۸,۹۸	۲۴,۸۶	۱۷,۴۹	۶,۵۱	میراگر با سختی ثابت	
۴۲,۶۶	۳۱,۴۴	۲۶,۲۰	۲۶,۱۰	۲۶,۵۶	۲۵,۹۳	۲۵,۳۳	۲۳,۷۲	۱۹,۲۳	۸,۲۵	میراگر پیشنهادی	

جدول ۶. پاسخ سازه تحت زلزله‌ی ال سنترو.

پاسخ سازه	نوع میراگر	شماره‌ی طبقات									
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
بیشینه‌ی اندازه‌ی جابه‌جایی (cm)	بدون میراگر	۳/۴۰	۶/۶۳	۹/۷۹	۱۲/۸۵	۱۵/۸۴	۱۸/۵۷	۲۰/۸۹	۲۲/۷۴	۲۴/۰۱	۲۴/۶۵
	میراگر با سختی ثابت	۳/۰۱	۵/۸۴	۸/۶۱	۱۱/۲۶	۱۳/۶۰	۱۵/۷۳	۱۷/۵۹	۱۹/۲۳	۲۰/۵۶	۲۱/۴۶
	میراگر پیشنهادی	۲/۱۹	۴/۱۵	۵/۹۴	۷/۶۶	۹/۵۳	۱۱/۴۸	۱۳/۲۴	۱۴/۸۳	۱۶/۰۷	۱۶/۸۸
RMS جابه‌جایی (mm)	بدون میراگر	۱۳/۰۰	۰/۴۹	۱/۰۶	۱/۸۲	۲/۶۹	۳/۵۹	۴/۴۴	۵/۱۸	۵/۷۱	۵/۹۹
	میراگر با سختی ثابت	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۳۰	۰/۵۲	۰/۷۸	۱/۰۵	۱/۳۲	۱/۵۷	۱/۷۸	۱/۹۲
	میراگر پیشنهادی	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۱۶	۰/۲۷	۰/۴۱	۰/۵۴	۰/۶۸	۰/۸۰	۰/۸۹	۰/۹۵
RMS شتاب (m/s ^۲)	بدون میراگر	۰/۵۹	۱/۹۶	۳/۷۸	۵/۸۶	۷/۹۵	۱۰/۰۲	۱۲/۱۰	۱۴/۱۸	۱۵/۹۸	۱۷/۱۵
	میراگر با سختی ثابت	۰/۱۷	۰/۵۳	۰/۹۷	۱/۴۷	۱/۹۸	۲/۴۷	۲/۹۵	۳/۴۳	۳/۹۰	۴/۳۵
	میراگر پیشنهادی	۰/۳۶	۰/۸۴	۱/۱۹	۱/۴۷	۱/۷۲	۱/۹۲	۲/۱۷	۲/۴۸	۲/۹۳	۳/۲۳

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار MATLAB یک ساختمان ۱۰ طبقه تحت شتاب ناشی از زمین‌لرزه قرار گرفته است، که نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد میراگر با سختی نرم‌شونده و میرایی نیمه‌فعال توانسته است به‌طور متوسط ۳۵٪ بیشینه‌ی

جابه‌جایی طبقات، ۷۰٪ RMS تمام طبقات، و ۵۰٪ RMS شتاب تمام طبقات را نسبت به حالت سازه‌ی بدون میراگر کاهش دهد. همچنین نشان داده شده است که میراگر در حالت سختی ثابت و غیرفعال می‌تواند در بعضی مواقع باعث افزایش RMS طبقات شود، اما چنین اتفاقی در میراگر پیشنهادی نمی‌افتد و این امر به‌دلیل استفاده از کنترل‌کننده است.

پانویس‌ها

1. tuned mass damper (TMD)
2. semi-active tuned mass damper
3. active tuned mass damper
4. hybrid tuned mass damper
5. magnetorheological damper
6. electroreological fluid
7. implication
8. aggregation
9. Borrego
10. El Centro

منابع (References)

1. Gutierrez Soto, M. and Adeli, H. "Tuned mass dampers", *Archives of Computational Methods in Engineering*, **20**(4), pp. 419-431 (2013).
2. Lu, X., Li, P., Guo, X., Shi, W. and Liu, J. "Vibration control using ATMD and site measurements on the Shanghai world financial center tower", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **23**(2), pp. 105-123 (2014).
3. Soleymani, M. and Khodadadi, M. "Adaptive fuzzy controller for active tuned mass damper of a benchmark tall building subjected to seismic and wind loads", *The*

Structural Design of Tall and Special Buildings, **23**(10), pp. 781-800 (2014).

4. Lu, X.L. and Jiang, H.J. "Research and practice of response control for tall buildings in mainland China", *Procedia Engineering*, **14**, pp. 73-83 (2011).
5. Asnafi, A.R. "Linear control systems", Iran: University of Yasuj (12 Feb. 2009).
[Online]. <<http://www.yu.ac.ir/DesktopModules/Content/Assets/asset1694/linearcontrolsystems872.pdf>>.
6. Alvarez, P., Kukreti, A., Mcelwain, B., Cohen, K., Thesing, L. and Edalath, S. "PD and fuzzy logic control for earthquake resilient structures", *Wiley Periodicals, Inc. Comput. Appl. Eng. Educ.*, **22**(1), pp. 142-152 (2014).
7. Edalath, S., Kukreti, A.R. and Cohen, K. "Enhancement of a tuned mass damper for building structures using fuzzy logic", *Journal of Vibration and Control*, **19**(12), pp. 1763-1772 (2012).
8. Das, D., Datta, T.K. and Madan, A. "Semi active fuzzy control of the seismic response of building frames with MR dampers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **41**(1), pp. 99-118 (2012).
9. Kim, H.S. and Kang, J.W. "Semi-active fuzzy control of a wind-excited tall building using multi-objective genetic algorithm", *Engineering Structures*, **41**, pp. 242-257 (2012).

10. Bruneau, M., Uang, C.M. and Sabelli, R., *Ductile Design of Steel Structures*, Second Edition, United States of America, McGraw-Hill, 905 p. (2011).

11. Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W. and Chung, R.M. "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**(6), pp. 617-635 (1997).

12. Yalla, S.K., Kareem, A. and Kantor, J.C. "Semi-active tuned liquid column dampers for vibration control of structures", *Engineering Structures*, **23**(11), pp. 1469-1479 (2001).

13. Zahrai, S.M., Zare, A., Khalili, M.K. and Asnafi, A. "Seismic design of fuzzy controller for semi-active tuned mass damper using top stories as the mass", *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, **14**(3), pp. 383-396 (2013).

14. Chey, M.H. "Passive and semi-active tuned mass damper building systems", Ph.D Thesis, New Zealand: University of Canterbury (2007).