

Investigation of New Proposed Model for Mass Damper with Geometrically Nonlinear Stiffness

Karim Badamchi^{1*}, Mohammad Khalil Khalili², Kia Badamchi³

1- Assistant Professor, dept. of Civil Engineering, Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Ph.D. Candidate, dept. of Civil Engineering, Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Ph.D. Candidate, dept. of Civil Engineering, Univ. of Urmia, Urmia, Iran

ABSTRACT

Many studies have been conducted showing that the mass damper improves the performance of structures against wind loads and seismic loads. This paper presents a model for passive tuned mass damper with softening stiffness; the Newton–Raphson method and state space were used to solve nonlinear equations of motion. To evaluate the performance of the proposed mass damper, an 11-storied steel structure subjected to the Northridge and Zaranth earthquakes was evaluated. This structure was initially modelled and analysed without a damper and with the softening PTMD. Then the effect of varying angles of the mass damper was investigated; eventually the damper was converted into a non-linear semi-active tuned mass damper. To reduce the displacements of the damper, fuzzy control was used for the controller. The results show that the proposed mass damper with a 60-degree angle could reduce the displacement in the earthquakes of Northridge and Zaranth by 48.8 and 36.2% on an average. The results of using different angles suggest that a 45-degree angle makes for the most favourable performance for the structure and mass damper. It points out that in the use of an isolator for the 11th floor, this floor has the potential for higher displacement than any other floor, but, in this article, using the controller and the proposed semi-active damper, it has been shown that this floor can also experience lower displacement.

ARTICLE INFO

Receive Date: 10 June 2019

Revise Date: 24 August 2019

Accept Date: 03 September 2019

Keywords:

Nonlinear tuned mass damper;
Semi-active tuned mass damper;
Softening stiffness;
Nonlinear analysis;
The Newton–Raphson method;
Geometrically nonlinear behavior.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.189443.1878

*Corresponding author: Karim Badamchi.

Email address: k.badamchi@tabrizu.ac.ir

بررسی یک مدل پیشنهادی برای میراگر جرمی با سختی غیرخطی هندسی نرم‌شونده

کریم بادامچی^{۱*}، محمد خلیل خلیلی^۲، کیا بادامچی^۳

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- دانشجوی دکتری دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

امروزه دانشمندان و پژوهشگران به دنبال روش‌هایی جهت کاهش هزینه‌های ساخت و افزایش ضریب ایمنی ساختمان‌ها هستند. یکی از روش‌های مناسب به منظور دست‌یابی به این اهداف؛ استفاده از میراگر جرمی می‌باشد که سبب بهبود عملکرد سازه در برابر بارهای باد و بارهای لرزه‌ای می‌شود. در این مقاله ابتدا یک مدل برای میراگر جرمی با سختی نرم‌شونده ارائه شده است. سپس جهت حل معادلات غیرخطی، از روش نیوتن - رفسون استفاده گردید. همچنین به منظور صحت‌سنجی روش به کار برده شده در این مقاله، به مدل‌سازی و تحلیل یک سازه یک درجه آزادی به همراه میراگر جرمی غیرخطی، به صورت تئوری و آزمایشگاهی پرداخته و در انتها برای بهبود عملکرد میراگر، میراگر در حالت نیمه‌فعال به کار برده شد. مدلسازیها و تحلیل‌های رایانه‌ای با به کارگیری نرم‌افزار *MATLAB* انجام گردید و برای به وجود آوردن حالت نیمه‌فعال در سازه از کنترل‌کننده فازی استفاده شد. همچنین جهت بررسی هر چه بهتر عملکرد میراگر جرمی پیشنهادی، یک سازه فولادی یازده طبقه تحت زلزله نورتریج و زرد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل سازه در حالت‌های بدون میراگر و با میراگر جرمی دارای سختی نرم‌شونده، نشان داد حضور میراگر جرمی موجب کاهش جابجایی‌ها گردیده است. این کاهش جابجایی‌ها در زلزله نورتریج و زرد برای طبقه زیر میراگر به ترتیب ۵۵ درصد و ۴۴ درصد به دست آمد.

کلمات کلیدی: میراگر جرمی غیرخطی، میراگر جرمی نیمه‌فعال، سختی نرم‌شونده، تحلیل غیرخطی، روش نیوتن-رفسون، رفتار

غیرخطی هندسی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.189443.1878	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.189443.1878	۱۴۰۰/۰۵/۳۰	۱۳۹۸/۰۶/۱۲	۱۳۹۸/۰۶/۱۲	۱۳۹۸/۰۶/۰۲	۱۳۹۸/۰۳/۲۰
			کریم بادامچی		*نویسنده مسئول:	
			K.badamchi@tabrizu.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

امروزه استفاده از میراگرها در سازه‌ها، توجه بسیاری از پژوهشگران را در نقاط مختلف جهان به خود معطوف نموده است [۱]. میراگر جرمی یکی از انواع میراگرها می‌باشد که از یک جرم با سختی و میرایی معین تشکیل می‌شود و در چهار حالت کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این چهار حالت عبارت است از میراگر جرمی غیرفعال، میراگر جرمی فعال، میراگر جرمی نیمه‌فعال و میراگر جرمی ترکیبی [۲-۳]. از مزایای میراگر جرمی غیرفعال می‌توان به کاهش هزینه‌های مقاوم‌سازی، کاهش اتلاف انرژی در اعضای سازه اصلی به هنگام ارتعاشات ناخواسته، کاهش سطح ارتعاشات نامطلوب در سازه اصلی و در نهایت افزایش ضریب ایمنی سازه به‌همراه کاهش خسارت‌های سازه در هنگام زلزله اشاره کرد. شایان ذکر است در به‌کارگیری میراگر جرمی غیرفعال به دو نکته باید توجه نمود. نخست آن‌که کارایی میراگر جرمی زمانی مشهود می‌گردد که موده‌های بالاتر به هنگام ارتعاشات، تأثیر زیادی نداشته باشند و دوم آن‌که؛ اولین اوج در تاریخچه پاسخ سازه به علت غیرفعال بودن میراگر، به‌سادگی کاهش نمی‌یابد. برای کاهش این اثرات نامطلوب می‌توان از دیگر حالت‌های کنترلی برای میراگر جرمی استفاده کرد که علاوه بر معایب و مزایای خود، هزینه‌ی تمام شده جهت ساخت و به‌کارگیری آن‌ها بیش از میراگر غیرفعال می‌باشد. [۴-۶]. از این‌رو در سال‌های اخیر محققین بسیاری جهت افزایش کارایی میراگرها، به معرفی رویکردهای جدید؛ جهت انتخاب پارامترهای بهینه‌ی میراگر، پرداخته‌اند [۷-۸]. فانگ^۱ و همکارانش با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی، پارامترهای بهینه در میراگرهای جرمی موجود در سازه‌های میرا را مورد بررسی قرار دادند و با ارائه روابط پیشنهادی خود؛ موفق به کاهش جابجایی سازه گردیدند [۹]. الیاس و همکارانش با قرار دادن میراگر جرمی در مکان‌های مختلف، عملکرد ساختمان‌های بلند مجهز به میراگر جرمی را در برابر بار باد مورد ارزیابی قرار دادند. از نتایج به‌دست‌آمده توسط این محققین، عملکرد بهتر میراگر جرمی به هنگام نصب در طبقه آخر بوده است [۱۰]. وانگ^۲ و همکارانش یک میراگر جرمی به‌صورت آونگ ضربه‌زننده را مورد بررسی و آزمایش قرار دادند. در مدل پیشنهادی این پژوهشگران از مواد ویسکوالاستیک در محدوده اعمال ضربه استفاده شده بود که این امر سبب اتلاف انرژی ورودی به سازه در ناحیه‌ی ضربه گردید [۱۱]. از دیگر روش‌های پیشنهادی جهت بهبود عملکرد میراگر جرمی می‌توان به استفاده از روش‌های نوین برای ایجاد الگوریتم کنترلی مناسب و یا استفاده از روش‌های بهینه‌سازی جهت انتخاب پارامترهای مختلف میراگر، اشاره نمود [۱۲-۱۴]. دی ماتئو^۳ و همکارانش با ترکیب میراگر جرمی تنظیم‌شونده و میراگر مایع تنظیم‌شونده، وسیله کنترلی را معرفی کردند که از مزایای هر دو میراگر مذکور برخوردار می‌باشد [۱۵]. از میراگر جرمی علاوه بر سازه‌های ساختمانی، در سازه‌های صنعتی و غیرساختمانی نیز استفاده گسترده می‌شود. وانگ و همکارانش برای کاهش ارتعاشات عمودی در یک پل پیاده‌روی فولادی، از میراگر جرمی تنظیم‌شونده استفاده کردند [۱۶]. الیاس^۴ و همکارانش بر اساس کنترل موده‌های یک دودکش صنعتی با میراگر جرمی و بهره‌گیری از روش نیومارک^۵ جهت حل معادلات حرکت سیستم، توانستند پاسخ‌های سازه مورد مطالعه را به هنگام باد، کاهش دهند [۱۷]. شی^۶ و همکارانش یک میراگر جرمی تنظیم‌شونده متغیر غیرفعال تطابقی را برای پل‌های پیاده‌روی پیشنهاد کردند. از مزایای میراگر پیشنهادی این محققین تنظیم فرکانس میراگر با نیروی کم بوده است که به‌منظور کنترل لرزش‌های ناشی از تحریکات انسانی عمودی، به‌کار برده شد [۱۸]. هم‌چنین پژوهشگران بسیاری به دنبال استفاده از رفتار غیر خطی، جهت بهبود عملکرد میراگرها می‌باشند [۱۹]. دزیدزیچ^۷ و همکارانش با استفاده از روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی به بررسی میرایی فرکانس و فشار هوا در میراگر مایع تنظیم‌شونده باز و بسته با رفتار غیرخطی پرداختند و سپس با استفاده از مدل آزمایشگاهی، نتایج پژوهش خود را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها در این مقاله ضمن پیشنهاد نحوه مدل‌سازی این نوع از میراگرها، روش شناسایی فرکانس طبیعی و نسبت میرایی غیرخطی میراگرهای مذکور را نیز ارائه کردند [۲۰].

در این مقاله ابتدا یک مدل پیشنهادی جدید برای میراگر جرمی با سختی نرم‌شونده معرفی گردید و سپس معادلات مورد استفاده و روش حل این معادلات ارائه گشت. هم‌چنین برای مدل‌سازی از فضای حالت و برای حل معادلات در حالت غیرخطی از روش نیوتن -

¹ Fang² Wang³ Di Matteo⁴ Elias⁵ Newmark⁶ Shi⁷ Dziejczek

رفسون^۸ استفاده شد. در ادامه صحت سنجی روش به کار برده شده و نتایج حاصل از تحلیل های یک سازه یازده طبقه ارائه گشت و در پایان جهت بهبود عملکرد میراگر جرمی، کنترل کننده فازی مورد استفاده قرار گرفت.

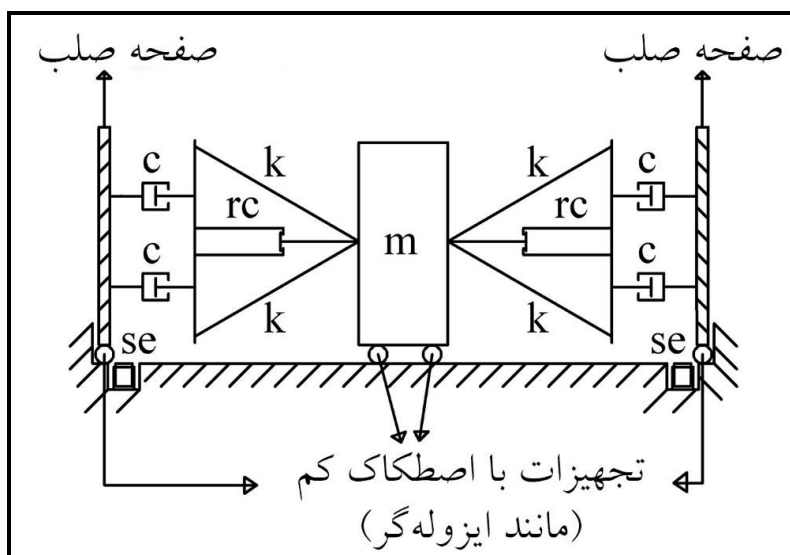
۲- میراگر جرمی نرم شونده غیرفعال

شکل ۱ طرحواره ی پیشنهادی برای میراگر جرمی نرم شونده را نشان می دهد. مطابق شکل ۱، به منظور ایجاد میراگر جرمی نرم شونده، جرم میراگر (m) در مرکز سیستم قرار داده شد. سپس جهت جلوگیری از کشش سختی ها (k) و نیز قرارگیری سختی ها در حالت نرم شونده از دو سیلندر صلب (rc) در طرفین استفاده گردید. از سوی دیگر این سیستم را می توان با میرایی نیمه فعال (c متغیر) نیز به کار برد. برای ایجاد میرایی نیمه فعال می توان از میراگرهای MR^۹ یا ER^{۱۰} استفاده کرد [۲۱] که با استفاده از کنترل کننده می توان در هر لحظه میرایی مناسب را به این میراگرها اعلام نمود تا این میراگرها میرایی مورد نظر را به سازه اعمال نمایند. هم چنین برای تحمل بارهای ثقلی می توان از ایزوله گر استفاده نمود.

معادله سختی هر یک از اعضای این میراگر را می توان مطابق رابطه ی ۱ به دست آورد:

$$K = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} co^2 & co \times s & -co^2 & -co \times s \\ co \times s & s^2 & -co \times s & -s^2 \\ -co^2 & -co \times s & co^2 & co \times s \\ -co \times s & -s^2 & co \times s & s^2 \end{bmatrix} + \frac{P}{L} \begin{bmatrix} s^2 & -co \times s & -s^2 & co \times s \\ -co \times s & co^2 & co \times s & -co^2 \\ -s^2 & co \times s & s^2 & -co \times s \\ co \times s & -co^2 & -co \times s & co^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

در رابطه ی ۱، co نشان دهنده $\cos \theta$ ، s نشان دهنده $\sin \theta$ ، زاویه بین عضو و محور افق، E، A، L و P به ترتیب مدول یانگ، سطح مقطع عضو، طول عضو و نیروی محوری است.



شکل ۱: مدل پیشنهادی برای میراگر جرمی نرم شونده

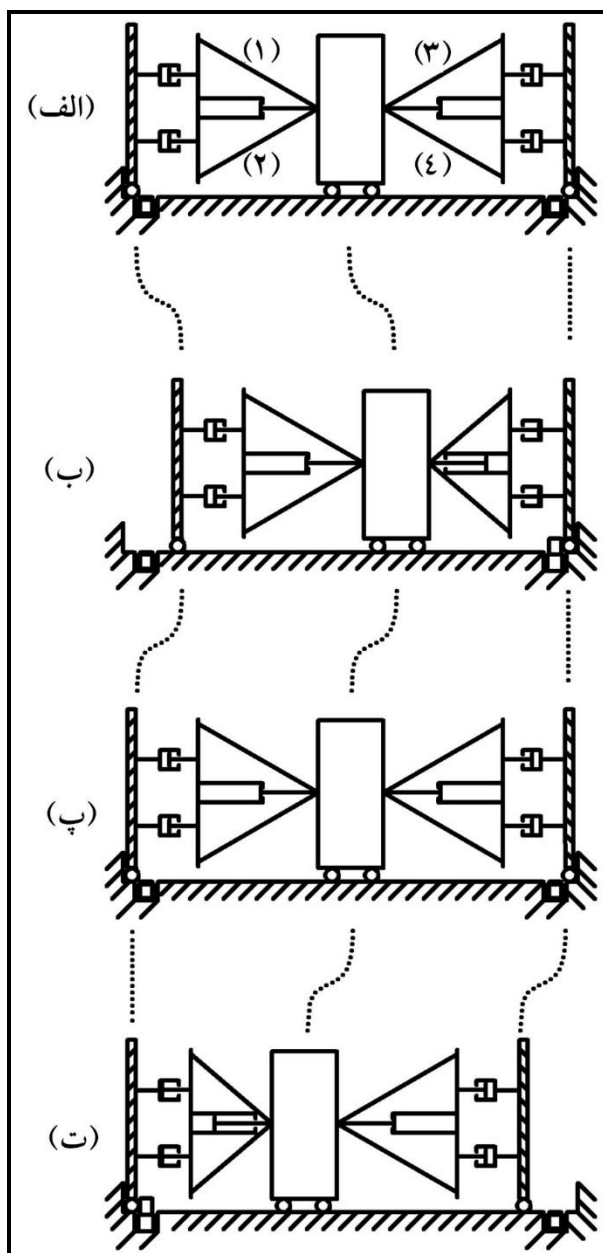
در شکل ۲ شیوه ی عملکرد میراگر در یک سیکل نشان داده شده است. در شکل ۲-الف، میراگر در حالت تعادل می باشد و حالت ۲-ب زمانی به وجود می آید که میراگر تحت تأثیر بار لرزه ای قرار می گیرد. در این حالت زمانی که جرم به سمت راست حرکت می نماید سختی های (۱) و (۲) به دلیل وجود rc تغییر طول نخواهند داشت اما سختی های (۳) و (۴) آزادانه تغییر طول می دهند و سیستم

^۸ Newton-Raphson

^۹ Magnetorheological damper

^{۱۰} Electroheological fluid

نرم‌شونده می‌شود. در این حالت موقع برگشت میراگر به حالت تعادل، زائده موجود در کف (se) مانع از حرکت صفحه صلب به طرف دیگر می‌گردد. هنگامی که سازه به حالت تعادل بازگردد شکل ۲-۲ پ به وجود می‌آید که در این حالت تمام زائده‌های موجود در کف به حالت اولیه برمی‌گردند. شکل ۲-۲ در زمان حرکت سازه در جهت مخالف اتفاق می‌افتد و se طرف دیگر بالا می‌آید. در این حالت سختی‌های (۱) و (۲) تغییر طول داده و سختی‌های (۳) و (۴) بدون کرنش می‌باشند.



شکل ۲: حالت‌های مختلف میراگر

۳- معادلات سازه و روش حل معادلات غیرخطی

زمانی که یک ساختمان تحت تأثیر نیروهای لرزه‌ای قرار می‌گیرد معادلات سازه در فضای حالت^{۱۱} به صورت زیر می‌شود:

^{۱۱} State space

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

در رابطه ۲؛ $[M]$ ، $[K]$ و $[C]$ به ترتیب ماتریس جرم، سختی و میرایی سازه است. هم‌چنین بردارهای u ، I و O به ترتیب ماتریس‌های جابجایی، واحد و صفر هستند. $\{r\}$ برداری است $n \times 1$ ، که تمام عناصر آن برای سازه‌های نیمه‌بلند برابر یک است. معادلات سازه با میراگر همانند معادله‌ی ۲ است با این تفاوت که به درجه آزادی سیستم، یک درجه اضافه می‌شود.

برای حل معادلات در حالت غیرخطی، ابتدا باید آن‌ها را در حالت خطی حل نمود و سپس با استفاده از روش‌های مختلف مانند نیوتن - رفسون، اولر^{۱۲} و یا روش‌های دیگر، عامل غیرخطی شونده را تصحیح کرد تا به هم‌گرایی مطلوب رسید.

روش نیوتن - رفسون به دو صورت روش نیوتن - رفسون کامل^{۱۳} و روش نیوتن رفسون اصلاح‌شده^{۱۴} می‌باشد. در هر مرحله از روش نیوتن - رفسون اصلاح‌شده ماتریس سختی به روز رسانی می‌گردد و این کار باعث کاهش حجم محاسبات و هم‌گرایی سریع‌تر می‌شود. در این مقاله ابتدا معادلات سازه و میراگر در فضای حالت تشکیل داده شد؛ سپس برای حل این معادلات با سختی غیرخطی، از روش نیوتن - رفسون استفاده گشت.

۴- مدل آزمایشگاهی میراگر جرمی غیرخطی

در این قسمت جهت صحت‌سنجی روش به کار برده شده، نتایج تئوری و آزمایشگاهی حاصل از مدل‌سازی و تحلیل یک سازه یک درجه آزادی به همراه میراگر جرمی غیرخطی، ارائه شده است. سیستم مورد آزمایش، مطابق شکل ۳ می‌باشد. جرم و سختی سازه مورد آزمایش به ترتیب ۵۷kg و ۲۶۳۷۰۰N/m می‌باشد. جرم میراگر مورد استفاده ۷/۸kg بوده و سختی میراگر از طریق کابل‌های متصل به میراگر تأمین گردیده است که در آن، قطر اسمی کابل مورد آزمایش ۳mm و طول هر کابل ۶۶cm در نظر گرفته شد. این میراگر دارای رفتار غیرخطی هندسی می‌باشد.



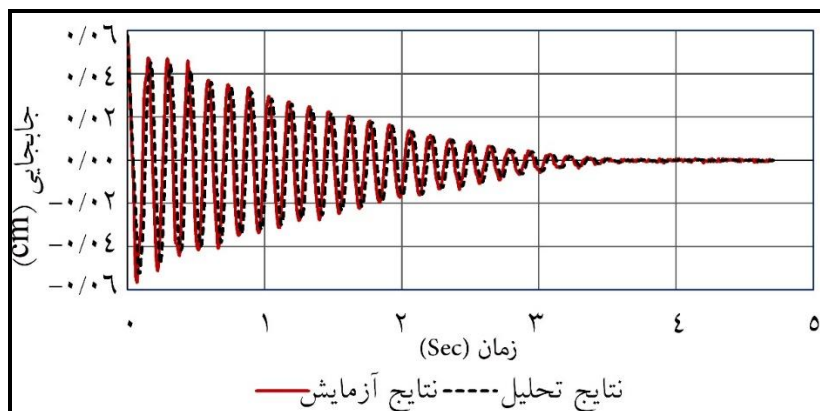
شکل ۳: سیستم مورد آزمایش در محل آزمایشگاه میز لرزه دانشکده عمران دانشگاه تبریز

هنگامی که سیستم موردنظر تحت ارتعاش آزاد با جابجایی اولیه ۰/۰۵۷۷cm قرار گرفت، جابجایی سازه بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش و تحلیل مطابق شکل ۴ به دست آمد.

¹² Euler

¹³ The full Newton-Raphson method

¹⁴ The modified Newton-Raphson method



شکل ۴: نتایج حاصل از آزمایش و مدل سازی هنگام جابجایی اولیه 0.0577 سانتی متر

همان طور که دیده می شود نتایج حاصل از محاسبات و نتایج حاصل از آزمایش اختلاف کمی با یکدیگر دارند؛ حداکثر اختلاف نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی برابر $7/6\%$ می باشد.

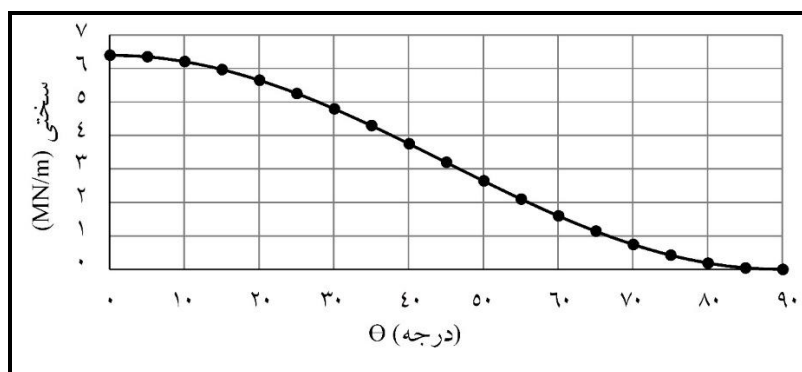
۵- مدل سازی و تحلیل سازه با میراگر جرمی غیرفعال نرم شونده

میراگر جرمی پیشنهاد شده در این پژوهش، یک سیستم نرم شونده است و در سیستم های نرم شونده، میزان استهلاک انرژی بیش تر می باشد. برای ارزیابی این میراگر، یک ساختمان یازده طبقه با میراگر جرمی غیرفعال نرم شونده بررسی شد. مشخصات این سازه یازده طبقه در جدول ۱ آمده است. برای این ساختمان نسبت میرایی 1% به کار گرفته شد و میرایی آن از طریق میرایی رایلی محاسبه گردید. برای ایجاد میراگر از جرم طبقه آخر استفاده شد [۷-۸] و سختی و میرایی اولیه میراگر به ترتیب 640250 N/m و 619340 N.sec/m در نظر گرفته شد [۲۲]. در معادله ۱، مقدار L اولیه ۱۰ متر برای هر عضو میراگر انتخاب گردید.

جدول ۱: مشخصات ساختمان یازده طبقه

شماره طبقه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
جرم طبقه (KN.s/m)	۲۱۵	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۰	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۳	۲۰۳	۲۰۳	۱۷۶
سختی طبقه (MN/m)	۴۶۸	۴۷۶	۴۶۸	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۳۷	۴۳۷	۴۳۷	۳۱۲

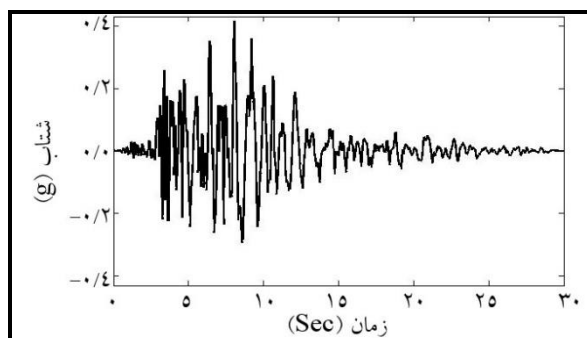
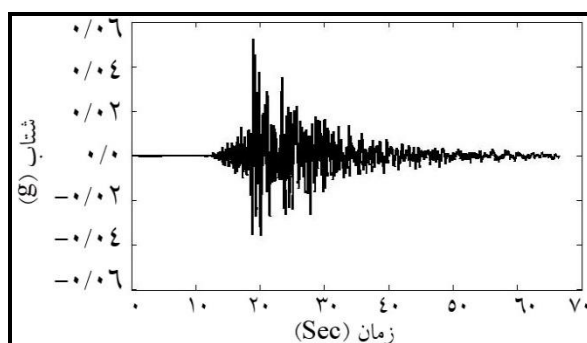
در میراگر فوق زاویه بین هر عضو میراگر با محور افق (θ) تأثیر مستقیم در سختی میراگر دارد. در شکل ۵ رابطه بین سختی میراگر و زاویه θ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۵، زمانی که زاویه θ بین 30° تا 60° درجه باشد، تغییرات θ بیشترین تأثیر را بر روی سختی خواهد داشت. برای مثال در زاویه 45° درجه، مقدار سختی برابر با 3201250 N/m می شود در حالی که در زاویه 50° درجه میزان سختی برای همان اعضای میراگر با EA/L یکسان، برابر با 2645359 N/m می شود.



شکل ۵: رابطه بین θ و سختی میراگر

۵-۱- میراگر جرمی با زاویه Θ برابر ۶۰ درجه

برای ارزیابی میراگر، مقدار Θ در رابطه ۲ برابر ۶۰ درجه انتخاب گردید و سازه تحت زلزله نورث ریج و زرد با تاریخچه‌های زمانی نشان داده شده؛ به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ قرار گرفت. نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها در جدول ۲ و ۳ گردآوری گردید. همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود حداکثر جابجایی طبقات در حالت بدون میراگر برای طبقات دهم، پنجم و اول به هنگام زلزله نورث ریج به ترتیب برابر ۴۸/۷۹۶۱، ۳۰/۷۱۴۹ و ۶/۵۶۰۵ سانتی‌متر است. در مقابل با به‌کارگیری میراگر جرمی میزان این جابجایی‌ها به ترتیب برابر ۲۱/۹۱۴۴، ۱۴/۵۳۰۹ و ۳/۲۳۹۹ سانتی‌متر گردید که کاهش ۵۵، ۵۳ و ۵۱ درصدی جابجایی را در این طبقات نشان داد. این درصد کاهش جابجایی‌ها برای طبقات دهم، پنجم و اول ساختمان به هنگام زلزله زرد به ترتیب ۴۴، ۴۰ و ۳۲ درصد است.

شکل ۶: تاریخچه زمانی شتاب زلزله نورث ریج - ایستگاه بوری هیلز^{۱۵}

شکل ۷: تاریخچه زمانی شتاب زلزله زرد - ایستگاه حرجند

جدول ۲: ماکزیمم جابجایی سازه تحت زلزله نورث ریج (cm)

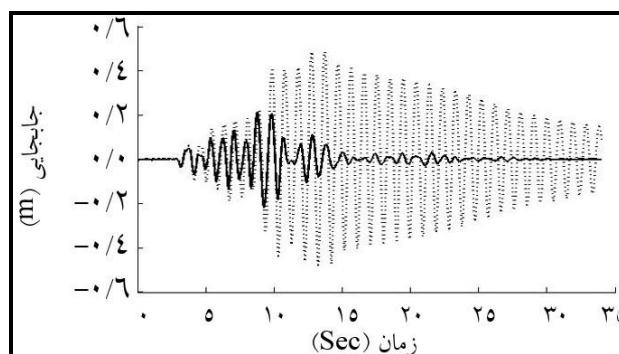
شماره طبقه	سازه بدون میراگر	سازه با میراگر پیشنهادی
۱	۶/۵۶۰۵	۳/۲۳۹۹
۲	۱۲/۸۵۱۶	۶/۲۸۸۲
۳	۱۹/۰۳۱۴	۹/۲۰۹۵
۴	۲۵/۱۰۴۲	۱۲/۰۰۴۳
۵	۳۰/۷۱۴۹	۱۴/۵۳۰۹
۶	۳۵/۷۷۸۸	۱۶/۷۳۰۱
۷	۴۰/۱۸۴۴	۱۸/۵۶۹۱
۸	۴۳/۹۵۱۶	۲۰/۰۸۲۴
۹	۴۶/۱۸۵۰۶	۲۱/۱۹۶۷
۱۰	۴۸/۷۹۶۱	۲۱/۹۱۴۴
۱۱	۵۰/۰۹۹۰	۴۶/۶۴۸۳

¹⁵ Beverly Hills

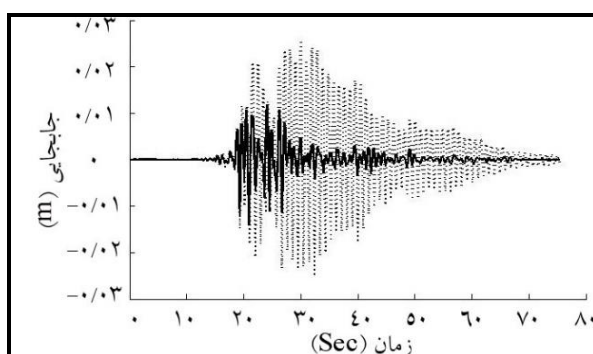
جدول ۳: ماکزیمم جابجایی سازه تحت زلزله زرنده (cm)

شماره طبقه	سازه بدون میراگر	سازه با میراگر پیشنهادی
۱	۰/۳۵۲۰	۰/۲۳۷۷
۲	۰/۶۹۳۱	۰/۴۶۳۸
۳	۱/۰۲۴۴	۰/۶۶۹۴
۴	۱/۳۴۰۴	۰/۸۴۵۰
۵	۱/۶۱۷۶	۰/۹۷۵۲
۶	۱/۸۴۹۹	۱/۰۶۱۶
۷	۲/۰۵۵۹	۱/۱۳۴۲
۸	۲/۲۵۳۵	۱/۲۴۸۴
۹	۲/۴۰۵۰	۱/۳۴۶۴
۱۰	۲/۵۲۴۰	۱/۴۰۹۲
۱۱	۲/۶۰۷۰	۲/۵۹۷۴

نمودار جابجایی طبقه دهم این سازه به هنگام زلزله نورث ریج و زرنده در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است. هم چنین پوش جابجایی طبقات در شکل ۱۰ آمده است.



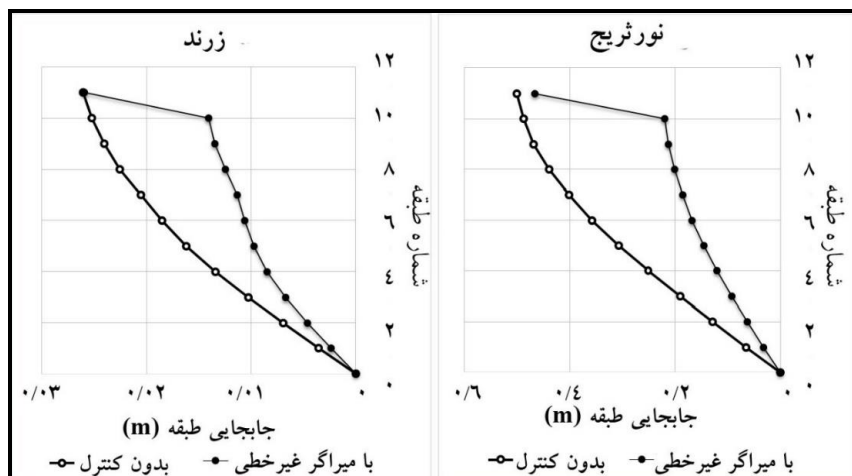
شکل ۸: جابه جایی جانبی طبقه دهم سازه برای زلزله نورث ریج



شکل ۹: جابه جایی جانبی طبقه دهم سازه برای زلزله زرنده

همان طور که در شکل ۸ و ۹ دیده می شود میراگر جرمی پیشنهادی سبب کاهش چشم گیر جابجایی ها در هر لحظه از زمان شد و در نتیجه 16^{RMS} جابجایی طبقات در طول زلزله کاهش یافت. برای مثال RMS جابجایی طبقه دهم در حالت بدون میراگر و با میراگر جرمی پیشنهادی در هنگام زلزله نورث ریج به ترتیب برابر ۴/۲۱۶ و ۰/۲۲۷ سانتی متر و برای زلزله زرنده به ترتیب برابر ۰/۰۵۸ و ۰/۰۰۵ میلی متر گردید. مطابق شکل ۱۰ کاهش جابجایی طبقه آخر که خود میراگر جرمی بوده است، نسبت به طبقات دیگر کم تر بوده و در زلزله نورث ریج حدود ۷ درصد و در زلزله زرنده حدود صفر می باشد.

¹⁶ Root mean square

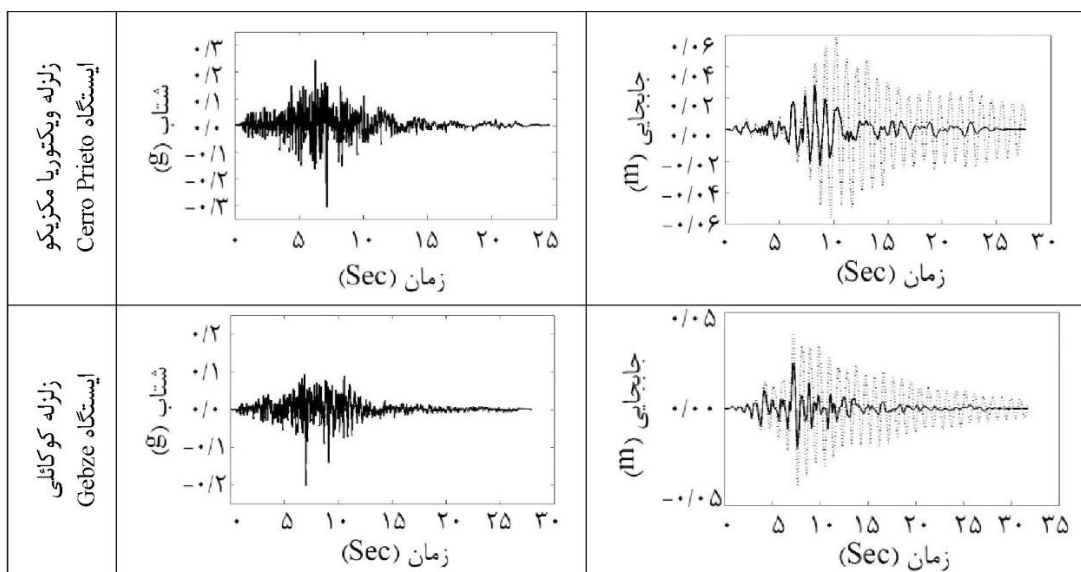


کل ۱۰: پوش جابجایی طبقات در هنگام زلزله‌های نورثریج و زرند

همچنین نتایج حاصل از تحلیل سازه تحت پنج زلزله کهک، سن‌فرناردو^{۱۷}، طبس، ویکتوریا مکزیکو^{۱۸} و کواکئیلی^{۱۹} در شکل ۱۱ و جدول ۴ آورده شده است.

نام زلزله	تاریخچه زمانی شتاب زلزله	ماکزیمم جابجایی سازه تحت زلزله ($\bullet\bullet\bullet\bullet$ بدون کنترل — با میراگر غیرخطی)
ایستگاه گازوران زلزله کهک		
ایستگاه Lake Hughes زلزله سن‌فرناردو		
ایستگاه طبس زلزله طبس		

¹⁷ San Fernando¹⁸ Victoria, Mexico¹⁹ Kocaeli



شکل ۱۱: تاریخچه زمانی شتاب پنج زلزله دیگر به همراه نتایج حاصل از تحلیل سازه تحت این زلزله‌ها

جدول ۴: ماکزیمم جابجایی سازه تحت پنج زلزله دیگر در حالت بدون میراگر و با میراگر غیرفعال (cm)

زلزله طبس		زلزله سن‌فرناردو		زلزله کهک		شماره طبقه
جابجایی بدون میراگر	جابجایی با میراگر	جابجایی بدون میراگر	جابجایی با میراگر	جابجایی بدون میراگر	جابجایی با میراگر	
۱/۴۳۳۹	۳/۵۳۹۸	۰/۱۷۷۶	۰/۴۲۴۲	۰/۱۱۸۹	۰/۱۹۸۵	۱
۲/۶۵۲۴	۶/۷۷۳۷	۰/۳۳۰۶	۰/۸۱۹۷	۰/۲۳۵۹	۰/۳۷۵۰	۲
۳/۶۵۲۷	۹/۶۹۵	۰/۴۸۰۳	۱/۱۸۴۴	۰/۳۵۱۶	۰/۵۵۵۷	۳
۴/۶۴۸	۱۲/۵۱۷۷	۰/۶۲۸۲	۱/۵۲۲۱	۰/۴۴۶۹	۰/۷۳۸۶	۴
۵/۷۰۰۹	۱۵/۲۱۲۴	۰/۷۴۸۹	۱/۸۱۳۸	۰/۵۱۰۸	۰/۹۱۲۴	۵
۶/۷۴۰۲	۱۷/۹۴۵۸	۰/۸۴۲۴	۲/۱۱۸۲	۰/۵۴۸۵	۱/۰۷۴۳	۶
۷/۷۹۸۷	۲۰/۰۷۳۲	۰/۹۱۸۳	۲/۳۸۷۳	۰/۵۸۰۳	۱/۲۱۹۹	۷
۸/۸۹۳۲	۲۱/۸۹۷۸	۰/۹۹	۲/۶۰۵۹	۰/۶۳۱۴	۱/۳۴۸۸	۸
۹/۶۸۶	۲۳/۸۷۱۶	۱/۰۵۷۷	۲/۷۶۴۵	۰/۷۱۳۸	۱/۴۵۳۱	۹
۱۰/۱۲۶۵	۲۵/۴۴۰۸	۱/۱۰۶۱	۲/۸۹۱۷	۰/۷۷۱۰	۱/۵۲۷۲	۱۰
۱۷/۷۷۲۵	۲۶/۵۳۹۴	۲/۳۸۵۸	۳/۷۰۰۰	۱/۱۵۵۲	۱/۵۷۹۹	۱۱

زلزله کوکائیلی		زلزله ویکتوریا مکزیکو		شماره طبقه
جابجایی بدون میراگر	جابجایی با میراگر	جابجایی بدون میراگر	جابجایی با میراگر	
۰/۳۴۳۶	۰/۵۹۵۳	۰/۳۵۲۵	۱/۱۰۰۵	۱
۰/۶۷۶۴	۱/۱۵۴۹	۰/۶۵۲۹	۲/۰۸۵۲	۲
۱/۰۱۳۱	۱/۶۷۱۷	۰/۹۷۰۹	۲/۹۳۵۴	۳
۱/۳۳۲۷	۲/۱۵۶۷	۱/۲۳۰۱	۳/۶۳۱۶	۴
۱/۶۱۲۶	۲/۶۴۵۹	۱/۴۱۸۶	۴/۱۵۳۳	۵
۱/۸۲۴۱	۳/۰۴۵۲	۱/۶۹۲۵	۴/۵۶۲۳	۶
۱/۹۵۶۳	۳/۳۵۸۹	۲/۰۸۱۷	۴/۸۹۸	۷
۲/۰۵۳۱	۳/۶۳۲۳	۲/۴۳۱۵	۵/۲۶۵۴	۸
۲/۲۳۲۸	۳/۸۶۴۶	۲/۶۹۱۶	۵/۶۴	۹
۲/۳۷۶۸	۴/۰۲۳۳	۲/۸۵۰۶	۵/۹۰۳	۱۰
۴/۰۴۵۴	۴/۱۲۰۹	۴/۱۳۹۸	۶/۰۸۶۶	۱۱

۲-۵- میراگر جرمی با زاویه Θ برابر ۶۰، ۴۵ و ۳۰ درجه

در این قسمت زاویه Θ در میراگر جرمی تغییر داده شد و اثر آن بر روی سازه؛ مورد ارزیابی قرار گرفت. با فرض زاویه Θ برابر ۶۰، ۴۵ و ۳۰ درجه و نیز یکسان بودن مقدار سختی اولیه برای این سه حالت، سازه تحت زلزله نورث ریج قرار گرفت. نتایج حاصله مطابق جدول ۵ به دست آمد.

جدول ۵: ماکزیمم جابجایی کف طبقات در هنگام زلزله نورث ریج (cm)

زاویه Θ			شماره طبقات
$\Theta=60^\circ$	$\Theta=45^\circ$	$\Theta=30^\circ$	
۳/۲۳۹۹	۳/۲۱۴۴	۳/۲۰۱۷	۱
۶/۲۸۸۲	۶/۲۳۴۷	۶/۲۰۸۵	۲
۹/۲۰۹۵	۹/۱۳۲۲	۹/۰۹۳۰	۳
۱۲/۰۰۴۳	۱۱/۹۰۶۲	۱۱/۸۵۶۴	۴
۱۴/۵۳۰۹	۱۴/۴۰۵۷	۱۴/۳۴۱۸	۵
۱۶/۷۳۰۱	۱۶/۵۹۲۰	۱۶/۵۲۱۷	۶
۱۸/۵۶۹۱	۱۸/۴۱۶۹	۱۸/۳۴۳۰	۷
۲۰/۰۸۲۴	۱۹/۹۲۰۸	۱۹/۸۳۸۲	۸
۲۱/۱۹۶۷	۲۱/۰۳۷۲	۲۰/۹۵۵۸	۹
۲۱/۹۱۴۴	۲۱/۷۶۱۵	۲۱/۶۸۴۴	۱۰
۴۶/۶۴۸۳	۴۷/۰۲۹۰	۴۷/۵۰۴۳	۱۱

همان طور که در جدول ۵ دیده می شود در زلزله نورث ریج؛ میراگر جرمی با زاویه Θ برابر ۳۰ درجه نسبت به میراگر جرمی با زاویه ۴۵ و ۶۰ درجه کاهش بیش تری در طبقات یک تا ده به وجود آورد اما طبقه یازده که خود میراگر جرمی بود، در Θ برابر ۳۰ درجه بیش ترین جابجایی و در ۶۰ درجه کم ترین جابجایی را دارا بود. این اتفاق به دلیل محتوای فرکانسی این زلزله و فرکانس های سازه است. شایان ذکر است با کاهش سختی میراگر، اثرات غیرخطی بیش تر و مشهودتر خواهد بود.

با توجه به نتایج به دست آمده می توان نتیجه گرفت که بهترین انتخاب برای زاویه عضو در میراگر جرمی، Θ برابر ۴۵ درجه است که در زلزله های مختلف دیگر نیز نتایج متعادل تری را در کاهش جابجایی طبقات و جابجایی خود میراگر نشان داد. قابل ذکر است که زوایای دیگری نیز مورد بررسی قرار گرفت که باز هم زاویه ۴۵ درجه بهترین عملکرد را از خود نشان داد.

۳-۵- میراگر جرمی نرم شونده با میرایی نیمه فعال

همان گونه که در شکل ۱۰ دیده می شود، کاهش جابجایی طبقه آخر در هنگامی که میراگر جرمی غیرفعال نرم شونده استفاده شد، چندان چشم گیر نبوده است. در این مرحله جهت کاهش بیش تر جابجایی طبقه آخر که خود میراگر جرمی می باشد، از کنترل کننده فازی و میرایی نیمه فعال استفاده گردید. کنترل کننده فازی از چهار قسمت تشکیل می شود: فازی ساز^{۲۰}، پایگاه قواعد فازی^{۲۱}، موتور استنتاج فازی^{۲۲} و دفازی ساز^{۲۳}.

فازی ساز با استفاده از توابع عضویت؛ فرآیند تبدیل داده های زبانی به مجموعه های فازی را انجام می دهد. برای کنترل کننده پیشنهادی این مقاله، مطابق شکل ۱۲، ورودی ها با استفاده از ۶ تابع عضویت جابجایی و ۶ تابع عضویت سرعت به مجموعه فازی تبدیل

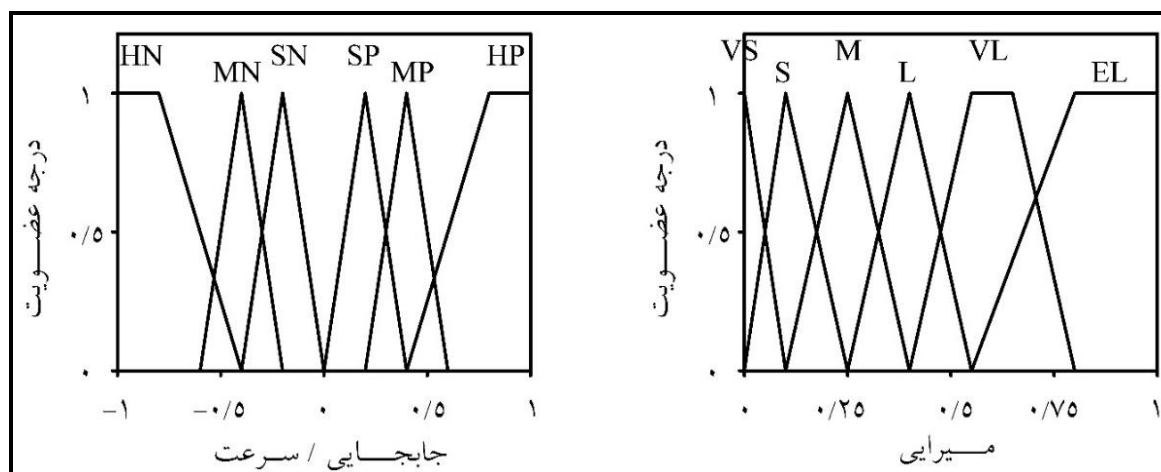
²⁰ Fuzzifier

²¹ Knowledge base

²² Inference system

²³ Defuzzifier

شدند (جهت سهولت در کار، توابع عضویت جابجایی و سرعت مشابه در نظر گرفته شد). همچنین با توجه به ۶ تابع عضویت میرایی نشان داده شده در این شکل، خروجی در سیستم فازی تعیین گردید.



شکل ۱۲: توابع عضویت جابجایی، سرعت و میرایی

فهرست علائم و اختصارات به کار رفته در شکل ۱۲، در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶: اختصارات به کار رفته در شکل ۱۱

توضیح	اختصار به کار رفته	توضیح	اختصار به کار رفته
میرایی خیلی کم	VS	جابجایی/سرعت زیاد و منفی	HN
میرایی کم	S	جابجایی/سرعت متوسط و منفی	MN
میرایی متوسط	M	جابجایی/سرعت کم و منفی	SN
میرایی زیاد	L	جابجایی/سرعت زیاد و مثبت	HP
میرایی خیلی زیاد	VL	جابجایی/سرعت متوسط و مثبت	MP
میرایی فوق العاده زیاد	EL	جابجایی/سرعت کم و مثبت	SP

پایگاه قواعد فازی از مجموعه‌ای از قواعد IF-THEN تشکیل شده است. این قواعد را می‌توان بر اساس میزان جابجایی و سرعت سازه تعیین کرد. در جدول ۷ پایگاه قواعد فازی مورد استفاده در این مقاله آمده است. برای مثال اگر جابجایی طبقه آخر سازه مقداری متوسط و منفی باشد اما سرعت طبقه آخر سازه زیاد و منفی باشد آنگاه به نیروی زیادی نیاز است تا از جابجایی بیش‌تر سازه جلوگیری شود.

جدول ۷: قوانین اگر-آنگاه فازی

جابجایی سرعت	LN	MN	SN	SP	MP	LP
HN	EL	EL	VL	VS	M	L
MN	EL	VL	L	VS	S	M
SN	VL	L	M	VS	S	M
SP	M	S	VS	M	L	VL
MP	M	S	VS	L	VL	EL
HP	L	M	VS	VL	EL	EL

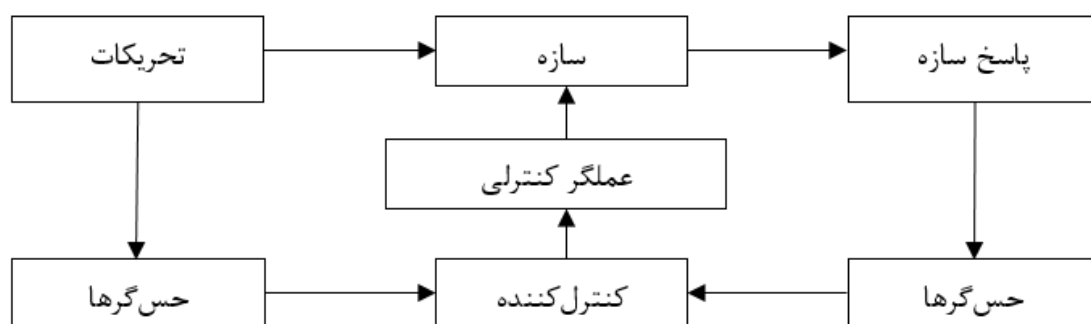
به‌عنوان نمونه یکی از این قوانین IF-THEN مورد استفاده به‌صورت زیر است.

IF Displacement is LN and Velocity is ZN THEN Damping is VL.

بر اساس قوانین موجود در پایگاه قواعد فازی و ورودی‌های فازی، موتور استنتاج فازی میزان خروجی مطلوب را محاسبه می‌نماید. به‌منظور عملکرد هرچه بهتر کنترل‌کننده پیشنهادی، موتور استنتاج مینیمم به‌کار گرفته شد. در این روش از عملگر مینیمم برای T-نرم‌ها، از عملگر ماکزیمم برای S-نرم‌ها، از استلزام مینیمم ممدانی برای دلالت کردن و از ماکزیمم برای استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه با ترکیب اجتماع استفاده گردید.

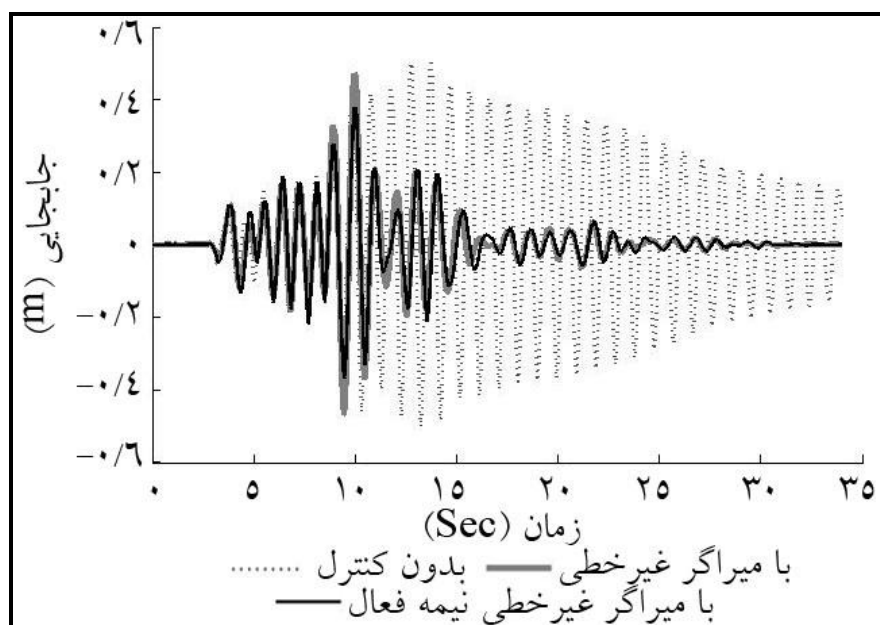
خروجی موتور استنتاج فازی یک خروجی فازی است که جهت به‌کارگیری برای میرایی یا سختی به‌عنوان یک مقدار باید تبدیل به یک عدد شود. این عمل توسط دفازی‌ساز صورت می‌گیرد. در این مقاله برای دفازی‌ساز از روش مرکز ثقل بهره برده شد.

مطابق شکل ۱۳ برای اعمال کنترل‌کننده؛ حسگرهایی بر روی سازه نصب می‌شوند تا پاسخ سازه و یا تحریکات وارد بر سازه را اندازه‌گیری نمایند و به سیستم کنترلی دهند. سیستم کنترلی بر اساس اطلاعات ورودی از حسگرها، در هر لحظه از زمان خروجی موردنیاز عملگرهای میراگر را تعیین می‌نماید تا میراگر بر اساس خروجی تعیین شده توسط سیستم کنترلی عمل نماید. این فرآیند تا زمان کاهش پاسخ سازه به حد موردنظر ادامه می‌یابد.



شکل ۱۳: دیاگرام سیستم‌های کنترلی

در این قسمت، سازه و میراگر دارای زاویه ۴۵ درجه، تحت زلزله نورث‌ریچ قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌ها در شکل ۱۴ و هم‌چنین در جدول ۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۴: جابجایی جانبی در طبقه دهم سازه هنگام زلزله نورث‌ریچ

جدول ۸: ماکزیمم جابجایی سازه تحت زلزله نورث ریج (cm)

شماره طبقه	سازه بدون میراگر	سازه با میراگر غیرخطی	سازه با میراگر غیرخطی نیمه فعال
۱	۶/۵۶۰۵	۳/۲۳۹۹	۳/۵۱۹۱
۲	۱۲/۸۵۱۶	۶/۲۸۸۲	۶/۵۷۸۱
۳	۱۹/۰۳۱۴	۹/۲۰۹۵	۹/۲۴۶۳
۴	۲۵/۱۰۴۲	۱۲/۰۰۴۳	۱۱/۷۰۰۷
۵	۳۰/۷۱۴۹	۱۴/۵۳۰۹	۱۳/۹۱۹۹
۶	۳۵/۷۷۸۸	۱۶/۷۳۰۱	۱۵/۹۳۳۱
۷	۴۰/۱۸۴۴	۱۸/۵۶۹۱	۱۸/۳۴۷۲
۸	۴۳/۹۵۱۶	۲۰/۰۸۲۴	۲۰/۵۲۶۳
۹	۴۶/۸۵۰۶	۲۱/۱۹۶۷	۲۲/۲۰۰۷
۱۰	۴۸/۷۹۶۱	۲۱/۹۱۴۴	۲۳/۲۸۷۲
۱۱	۵۰/۰۹۹۰	۴۶/۶۴۸۳	۳۷/۸۸۱۷

همان طور که در شکل ۱۴ دیده می شود، با استفاده از کنترل کننده فازی به هنگام زلزله نورث ریج جابجایی طبقه آخر که خود میراگر جرمی است، میزان حداکثر جابجایی؛ کاهش پیدا کرد. این کاهش در حالت استفاده از میراگر جرمی نیمه فعال غیرخطی، ۲۴ درصد می باشد در حالی که با استفاده از میراگر جرمی غیرفعال نرم شونده، ۵ درصد است. با توجه به جدول ۸ مشاهده می شود که استفاده از حالت نیمه فعال، در بعضی از طبقات زیر میراگر، جابجایی را نسبت به حالت غیرفعال، کمی کاهش می دهد و در بعضی دیگر از طبقات باعث افزایش کمی در جابجایی می گردد. این موضوع به دلیل آن است که هدف از نیمه فعال کردن میراگر در این مقاله، کاهش جابجایی خود میراگر بود و طراحی کنترل کننده بر این اساس انجام گرفته شد. البته باید توجه شود که در این پژوهش فرض شده است سازه در حالت الاستیک باقی بماند و فقط میراگر در اثر نیروهای وارده به حالت سختی غیرخطی هندسی رود. هم چنین در مدل پیشنهادی حالت نیمه فعال، بحث تأخیر زمانی در پاسخ های سیستم کنترلی در نظر گرفته نشده است.

۶- نتیجه گیری

امروزه دانشمندان به دنبال استفاده از قابلیت های غیرخطی در سازه ها جهت کاهش هرچه بهتر پاسخ ساختمان ها به هنگام زلزله می باشند. در این مقاله با ارائه یک مدل برای میراگر جرمی غیرفعال نرم شونده، به بررسی رفتار یک ساختمان یازده طبقه با این میراگر پرداخته شد. این میراگر دارای رفتار غیرخطی هندسی بوده و سختی میراگر تحت تأثیر نیروهای لرزه ای به حالت غیرخطی می رود. هم چنین از جرم طبقه آخر برای ایجاد میراگر استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که میراگر جرمی پیشنهادی با زاویه ۶۰ درجه توانست میزان جابجایی ها را در زلزله های نورث ریج و زرد به طور متوسط به ترتیب ۴۸/۸ و ۳۶/۲ درصد کاهش دهد. در قسمت دوم مقاله زوایای مختلف برای سختی میراگر جرمی مورد مطالعه، بررسی گردید. نتایج به دست آمده از این قسمت حاکی از آن است که زاویه ۴۵ درجه سبب مطلوب ترین عملکرد برای سازه و میراگر جرمی می شود. هم چنین تحلیل ها نشان داد که با وجود میراگر بودن طبقه یازدهم، این طبقه امکان جابجایی بیش تری را نسبت به سایر طبقات دارد اما در این مقاله با استفاده از کنترل کننده و نیمه فعال کردن میراگر پیشنهادی، این طبقه نیز جابجایی های کمتری را تجربه کرد. میزان این کاهش جابجایی در زلزله نورث ریج برای حالت سازه با میراگر نیمه فعال نسبت به سازه مجهز به میراگر غیرفعال، ۲۴ درصد می باشد.

سپاس گذاری

نویسندگان این مقاله از هم فکری جناب آقای دکتر مجید برقیان و دکتر مسعود حاجی علیلوی بناب کمال سپاس گذاری را دارند.

مراجع

- [1] Soto, M.G., and Adeli, H. (2013). Tuned mass dampers. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 20(4), 419-431.
- [2] Zahrai, S.M., Zare, A., Khalili, M.K., and Asnafi, A. (2013). Seismic design of fuzzy controller for semi-active tuned mass dampers using top stories as the mass. *Asian Journal of Civil Engineering*, 14(3), 383-396.
- [3] Chesné, S., Inquieté, G., Cranga, P., Legrand, F., and Petitjean, B. (2019). Innovative hybrid mass damper for dual-loop controller. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 115, 514-523.
- [4] Nagarajaiah, S. (2009). Adaptive passive, semiactive, smart tuned mass dampers: identification and control using empirical mode decomposition, Hilbert transform, and short-term Fourier transform. *Structural Control and Health Monitoring*, 16(7-8), 800-841.
- [5] M. Rafieipour, M.H., Ghorbani-Tanha, A.K., Rahimian, M., and Mohammadi-Ghazi, R. (2014). A novel semi-active TMD with folding variable stiffness spring. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13(3), 509-518.
- [6] Khalili, M.K., (2010). Design of fuzzy controller for semi-active mass dampers of structures. M.Sc. Thesis. University of Yasouj. Faculty of engineering. Department of civil engineering.
- [7] Chey M.H., Chase J.G., Mander J.B., and Carr A.J. (2010). Semi-active tuned mass damper building systems: design. *Journal of Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 39, 119-139.
- [8] Chey M.H., Chase J.G., Mander J.B., and Carr A.J. (2010). Semi-active tuned mass damper building systems: application. *Journal of Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 39: 69-89.
- [9] Fang, H., Liu, L., Zhang, D., and Wen, M., (2019). Tuned mass damper on a damped structure. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(3), e2324.
- [10] Elias, S., and Matsagar, V. (2018). Wind response control of tall buildings with a tuned mass damper. *Journal of Building Engineering*, 15, 51-60.
- [11] Wang, W., Hua, X., Chen, Z., Wang, X., and Song, G. (2019). Modeling, simulation, and validation of a pendulum-pounding tuned mass damper for vibration control. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(4), e2326.
- [12] Lu, X., Zhang, Q., Weng, D., Zhou, Z., Wang, S., Mahin, S.A., Ding, S., and Qian, F. (2017). Improving performance of a super tall building using a new eddy-current tuned mass damper. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(3), 1882-1898.
- [13] Zhang, H.Y., and Zhang, L.J. (2017). Tuned mass damper system of high-rise intake towers optimized by improved harmony search algorithm. *Engineering Structures*, 138, 270-282.
- [14] Edalath, S., Kukreti, A.R., and Cohen, K. (2013). Enhancement of a tuned mass damper for building structures using fuzzy logic. *Journal of Vibration and Control*, 19(12), 1763-1772.
- [15] Di Matteo, A., Pirrotta, A., and Tumminelli, S. (2017). Combining TMD and TLCD: analytical and experimental studies. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 167, 101-113.
- [16] Wang, D., Wu, C., Zhang, Y., and Li, S. (2019). Study on vertical vibration control of long-span steel footbridge with tuned mass dampers under pedestrian excitation. *Journal of Constructional Steel Research*, 154, 84-98.
- [17] Elias, S., Matsagar, V., and Datta, T.K. (2019). Along-wind response control of chimneys with distributed multiple tuned mass dampers. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(1), 2275-2300.
- [18] Shi, W., Wang, L., Lu, Z., and Wang, H. (2019). Experimental and numerical study on adaptive-passive variable mass tuned mass damper. *Journal of Sound and Vibration*, 452, 97-111.
- [19] Khalili, M.K., and Badamchi, K. (2017). Use mass damper with nonlinear stiffness and semi-active damping. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33, 47-54.
- [20] Dzedziech, K., Ghosh, A., Iwaniec, J., Basu, B., Staszewski, W.J., and Uhl, T. (2018). Analysis of tuned liquid column damper nonlinearities. *Engineering Structures*, 171, 1027-1033.
- [21] Zhu, W.Q., Luo, M., and Dong, L. (2004). Semi-active control of wind excited building structures using MR/ER dampers. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 19(3), 279-285.
- [22] Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W., and Chung, R.M. (1997). A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26(6), 617-635.