

تقویت سازه‌های بتنی با مدل میراگر جرمی پیشنهادی دارای سختی غیرخطی

محمد خلیل خلیلی*^۱، کریم بادامچی^۲، مجید برقیان^۳

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

Email:

M64.khalili@gmail.com

k.badamchi@tabrizu.ac.ir

Barghian@tabrizu.ac.ir

چکیده:

با توجه به این که ایران در منطقه لرزه‌خیز قرار دارد، بسیاری از سازه‌های بتنی باید در برابر بارهای زلزله مقاومت کافی داشته باشند. امروزه در بسیاری از نقاط جهان استفاده از میراگرهای جرمی در ساختمان‌های بتنی، روشی است که برای کاهش پاسخ ساختمان‌های موجود و یا ساختمان‌های جدید بتنی به کار برده می‌شوند. برای بررسی و ارزیابی هرچه بهتر میراگرها باید رفتار غیر خطی آنها را نیز در نظر گرفت. در این مقاله با پیشنهاد یک مدل غیرخطی برای میراگر جرمی، رفتار غیر خطی هندسی این میراگر بر روی یک سازه‌ی بتنی ده طبقه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج به دست آمده برای این سازه‌ی بتنی نشان می‌دهد که در هنگام زلزله‌ی سنترو، میراگر جرمی با سختی غیر خطی توانسته است میزان جابجایی طبقه دهم را ۵۸ درصد و میزان جابجایی طبقه هشتم را ۴۷ درصد کاهش دهد.

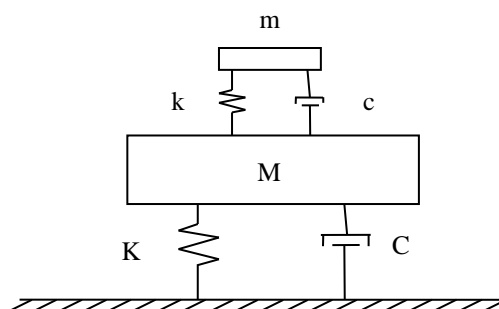
واژه‌های کلیدی: سختی غیرخطی، میراگر، میراگر جرمی نیمه‌فعال، غیرخطی هندسی.

۱- مقدمه:

برای کاهش ارتعاشات نامطلوب در بسیاری از صنایع می‌توان از میراگر جرمی بهره برد. بسیاری از سازه‌های بتنی در جهان وجود دارد که برای افزایش مقاومت و پایداری آنها در برابر نیروهای جانبی، از میراگر جرمی استفاده شده است. همچنین کارایی این میراگرها در سازه‌های بتنی، در تئوری و عمل به اثبات رسیده است [۱-۳]. میراگر جرمی غیر فعال یکی از انواع میراگرها می‌باشد که از یک جرم با سختی و میرایی تشکیل شده است. سختی و میرایی در میراگر جرمی غیر فعال بدون اعمال هیچ کنترل کننده‌ای در طول زمان تعیین می‌شوند. در میراگرهای جرمی نیمه فعال و فعال می‌توان از یک کنترل کننده برای بهبود عملکرد میراگر جرمی استفاده کرد [۴ و ۵]. مطالعات زیادی برای تعیین متغیرهای بهینه‌ی میراگرهای جرمی غیر فعال انجام گرفته شده است و روابط مناسبی توسط محققین ارائه شده است [۶]. یکی از راهکارهای بوجود آوردن میراگر جرمی، استفاده از ظرفیت‌های غیرخطی آنها می‌باشد. برای مثال می‌توان از میراگر جرمی با سختی غیر خطی و یا میرایی غیر خطی استفاده کرد [۷-۹]. در این مقاله با در نظر گرفتن حالت غیرخطی هندسی میراگر، عملکرد یک سازه‌ی بتنی به همراه میراگر مورد بررسی قرار گرفته می‌شود.

۲- میراگر جرمی غیرفعال:

اساس کار میراگرهای جرمی تنظیم شونده (TMD¹) بر روی اضافه کردن سیستم لرزه‌ای ثانویه به یک سیستم لرزه‌ای اولیه است که این جرم با نوسان کردن عمل متقابلی در برابر حرکت سیستم اصلی از خود نشان می‌دهد. نمونه ثانویه فقط کسری از جرم سیستم اولیه است. بنابراین با اضافه کردن یک میزان کمی از جرم ثانویه، لرزش سیستم اولیه می‌تواند به میزان زیادی کاهش پیدا کند [۱۰]. در شکل ۱ یک میراگر جرمی متصل به یک سازه‌ی یک درجه آزادی نشان داده شده است. در این شکل M ، C و K بترتیب جرم، میرایی و سختی سازه‌ی اصلی، m ، c و k بترتیب جرم، میرایی و سختی میراگر است.



شکل ۱. سازه به همراه میراگر جرمی غیر فعال

در واقع هدف از به کارگیری یک میراگر جرمی تنظیم شده، کاهش تقاضای اتلاف انرژی در اعضای سازه اصلی تحت اثر نیروهای خارجی است. در این حالت این کاهش تقاضا توسط انتقال مقداری از انرژی سازه‌ای به میراگر جرمی تنظیم شده است. معادلات سازه بدون TMD در حالت ارتعاش تحت تحریکات زمین لرزه در فضای حالت به صورت زیر می‌باشد:

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

که در آن $[M]$ ، $[K]$ و $[C]$ به ترتیب ماتریس جرم، سختی و میرایی سازه است. همچنین بردارهای I و O به ترتیب ماتریس‌های واحد و صفر هستند. $\{r\}$ برداری است $n \times 1$ که تمام عناصر آن برای سازه‌های نیمه بلند برابر یک است. معادلات سازه با TMD در حالت ارتعاش تحت تحریکات زمین لرزه در فضای حالت به صورت زیر می‌باشد:

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

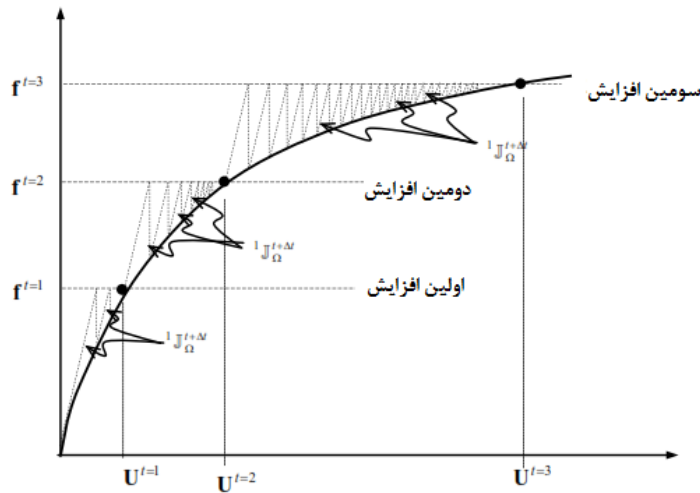
¹ Tuned Mass Damper

در رابطه‌ی ۲، $\{r_T\}$ برداری است $1 \times (n+1)$ که تمام عناصر آن یک است.

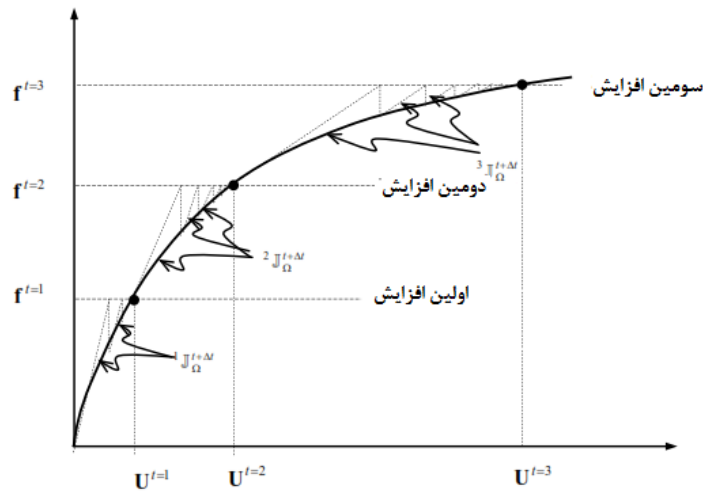
۳- روش‌های حل معادلات:

برای حل معادلات خطی سازه در حالت دینامیکی روش‌های مختلفی وجود دارد از جمله انتگرال گیری مستقیم، استفاده از انتگرال دیوهامل و جمع آثار مدها، فضای حالت و برای حل معادلات غیرخطی می‌توان از روش‌های خطی استفاده کرد که البته برای تصحیح عامل غیرخطی می‌توان یکی از روش‌های نموی و یا تکرار مانند اولر، رانگ - کاتا و یا نیوتن - رافسون را به کار برد.

روش نیوتن - رافسون به دو صورت نیوتن رافسون کامل و نیوتن - رافسون اصلاحی می‌باشد. در شکل ۲ و ۳ حل معادلات دینامیکی غیرخطی با روش نیوتن - رافسون نشان داده شده است.



شکل ۲. روش نیوتن - رافسون با سختی اولیه [۱۰]



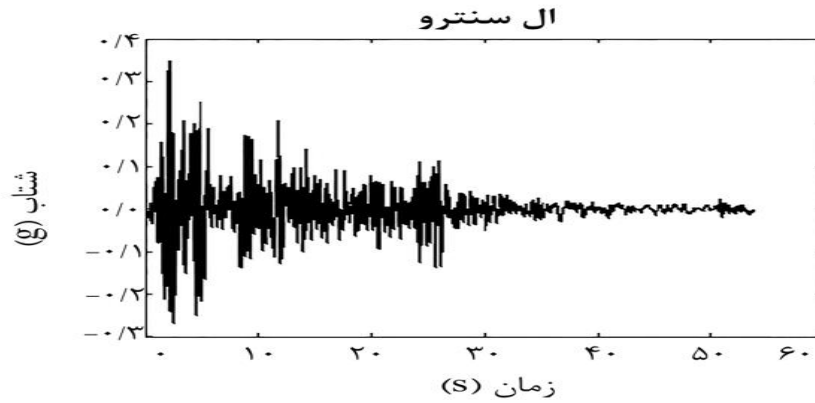
شکل ۳. به روز کردن روش نیوتن - رافسون در ابتدای هر گام زمانی [۱۰]

قابل ذکر است که در هر مرحله می‌توان ماتریس سختی را به روز کرد که این کار باعث کاهش حجم محاسبات و همگرایی سریع‌تر می‌شود.

در این مقاله برای حل معادلات دینامیکی از فضای حالت استفاده شده است و برای تصحیح عامل غیرخطی، روش نیوتن - رافسون به کار گرفته شده است.

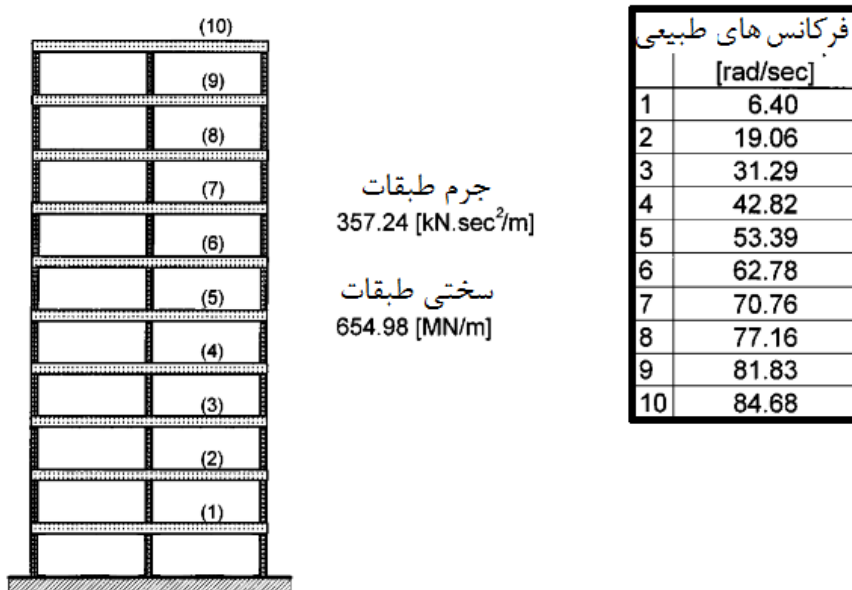
۴- بررسی ساختمان بتنی با میراگر دارای سختی غیرخطی:

برای مدل سازی و تحلیل یک ساختمان ۱۰ طبقه تحت زلزله‌ی السنترو^۱ با شتاب نگاشت نشان داده شده در شکل ۴ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.



شکل ۴. نمودار تاریخچه زمانی زلزله السنترو

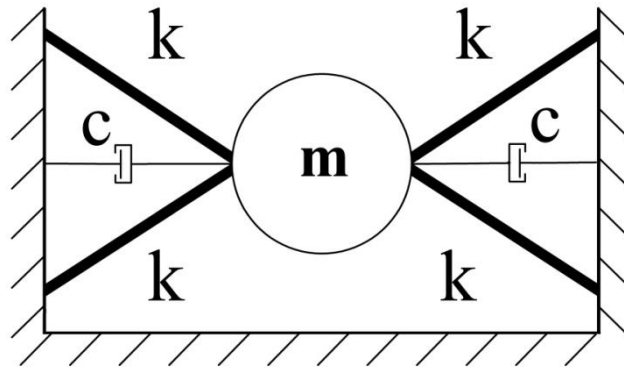
این سازه یک ساختمان برشی است که مساحت طبقات آن حدود ۴۰۰ متر مربع است. مشخصات این سازه در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵. مشخصات سازه مورد مطالعه

برای این سازه از طبقه آخر به عنوان میراگر جرمی استفاده شده [۱۲] و سختی و میرایی میراگر جرمی بترتیب $1/1178 \times 10^7 \text{ N/m}$ و $1/334 \times 10^6 \text{ MN.sec/m}$ انتخاب شده است [۶]. مدل غیر خطی برای میراگر جرمی به صورت شکل ۶ است.

¹ El Centro



شکل ۶. مدل غیرخطی میراگر پیشنهادی

همچنین می‌توان میرایی سازه را مطابق رابطه‌ی ۳ و ۴ از طریق میرایی رایلی به دست آورد.

$$[C] = a_0 [M] + b_0 [K] \quad (۳)$$

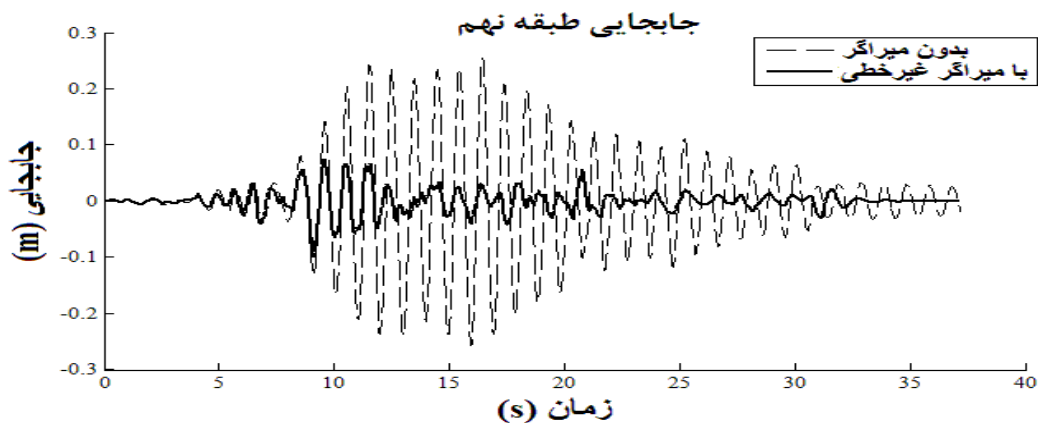
$$\begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix} = \frac{2\zeta}{\omega_n + \omega_m} \begin{pmatrix} \omega_n \omega_m \\ 1 \end{pmatrix} \quad (۴)$$

که در این رابطه ζ درصد میرایی سازه، ω_n و ω_m فرکانس‌های طبیعی سازه هستند. برای این ساختمان نسبت میرایی ۱ درصد به کار گرفته شده و برای یافتن a و b مدهای اول و دوم استفاده شده است. برای مدل‌سازی میراگر جرمی کافی است که در مدل‌ها این میراگر را مانند یک طبقه بالای طبقات دیگر در نظر گرفت. بنابراین معادلات سازه با میراگر به صورت رابطه ۵ می‌شود.

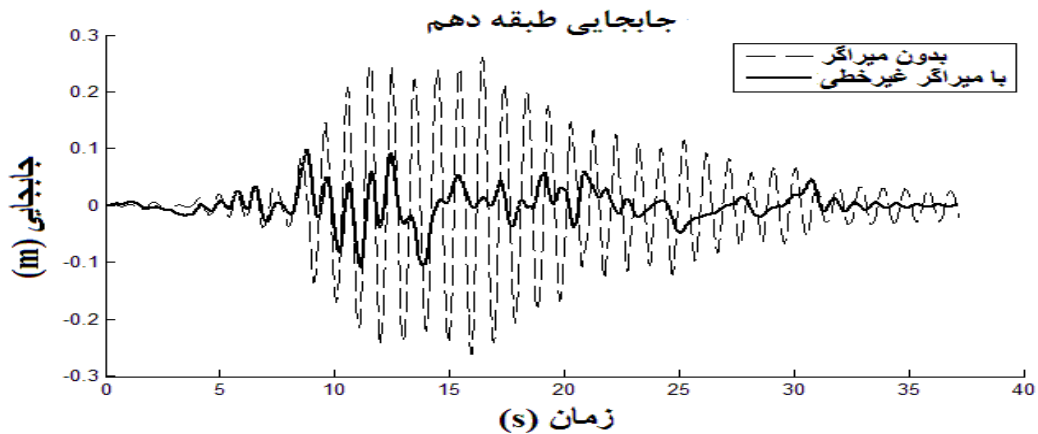
$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{x} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X} \\ \dot{x} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ x \end{Bmatrix} = -\ddot{X}_g \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \quad (۵)$$

که در این رابطه M ، K و C به ترتیب ماتریس جرم، سختی و میرایی سازه و m ، k و c به ترتیب ماتریس جرم، سختی و میرایی میراگر است. البته پاسخ سازه باید در هر مرحله از روش‌های غیر خطی به دست آید.

هنگامی که این سازه تحت زلزله‌ی السنترو قرار می‌گیرد، تاریخچه زمانی جابجایی طبقه نهم و دهم به ترتیب مطابق شکل ۷ و ۸ می‌باشد. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، میراگر جرمی با سختی غیرخطی توانسته است میزان حداکثر جابجایی طبقات را به مقدار مناسبی کاهش دهد. حداکثر اندازه‌ی جابجایی‌ها برای طبقه نهم در حالت بدون کنترل (حالت سازه بدون میراگر) ۰/۲۵۶۱ متر و با میراگر غیرخطی ۰/۱۳۹۱ متر می‌باشد. همچنین این میزان جابجایی‌ها برای طبقه دهم به ترتیب ۰/۲۶۰۶ و ۰/۱۰۹۱ متر است.



شکل ۷. تاریخچه زمانی جابجایی سقف طبقه نهم در هنگام زلزله السنترو



شکل ۸. تاریخچه زمانی جابجایی سقف طبقه دهم در هنگام زلزله سنترو

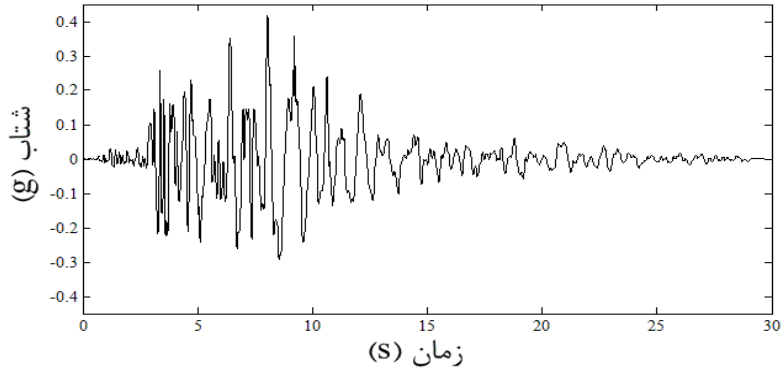
میزان حداکثر جابجایی طبقات، RMS جابجایی طبقات، میزان حداکثر شتاب و RMS شتاب طبقات در هنگام زلزله سنترو در جدول ۱ آورده شده است. همان طور که در این جدول دیده می‌شود، بعد از استفاده از میراگر با سختی غیرخطی، حداکثر جابجایی طبقات، RMS جابجایی طبقات، حداکثر شتاب طبقات و RMS شتاب طبقات کاهش پیدا کرده است. میزان این کاهش‌ها برای طبقه نهم به ترتیب ۰/۴۶٪، ۰/۸۷٪، ۰/۶٪ و ۰/۶۵٪ و برای طبقه پنجم به ترتیب ۰/۴۵٪، ۰/۸۶٪، ۰/۳۷٪ و ۰/۶۵٪ و برای طبقه اول به ترتیب ۰/۴۷٪، ۰/۸۵٪، ۰/۲۱٪ و ۰/۲۶٪ است.

جدول ۱. پاسخ سازه تحت زلزله سنترو در حالت‌های کنترلی مختلف

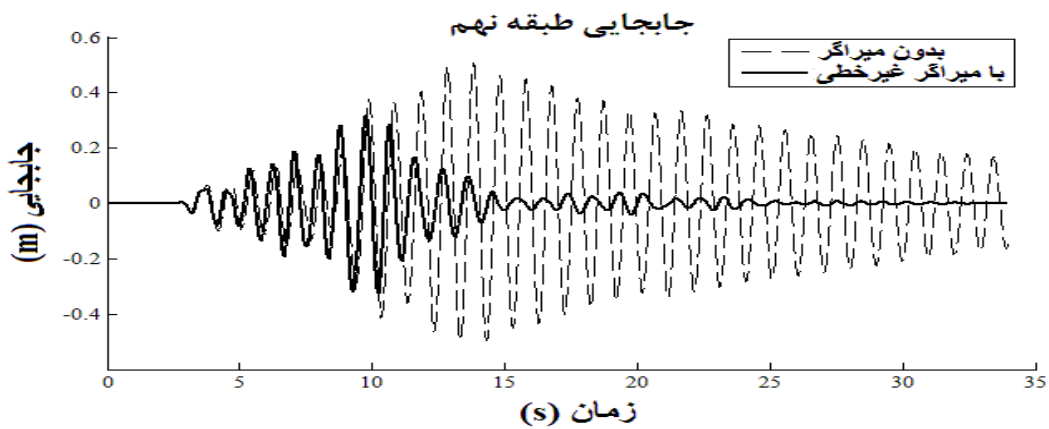
شماره طبقات	حداکثر جابجایی (m)		RMS جابجایی (mm)		حداکثر شتاب (m/s ²)		RMS شتاب (m/s ²)	
	بدون میراگر	با میراگر غیرخطی	بدون میراگر	با میراگر غیرخطی	بدون میراگر	با میراگر غیرخطی	بدون میراگر	با میراگر غیرخطی
۱	0.0438	0.0231	0.20	0.03	9.89	7.80	2.87	2.12
۲	0.0847	0.0436	0.77	0.12	12.73	10.25	6.41	4.12
۳	0.1216	0.0641	1.65	0.24	13.38	10.23	8.66	3.91
۴	0.1534	0.0832	2.76	0.40	12.74	10.08	9.74	3.47
۵	0.1808	0.0987	4.01	0.57	13.98	8.84	10.91	3.77
۶	0.2075	0.1095	5.29	0.74	16.11	10.08	12.56	4.20
۷	0.2297	0.1193	6.49	0.89	16.12	13.08	13.85	4.18
۸	0.2460	0.1312	7.50	1.01	14.50	14.69	15.49	4.43
۹	0.2561	0.1391	8.24	1.08	16.39	15.37	17.81	6.16
۱۰	0.2606	0.1091	8.64	0.76	20.01	8.29	21.21	1.81

برای مقایسه‌ی هرچه بهتر رفتار اولیه‌ی سازه‌ی بتنی با رفتار سازه‌ی دارای میراگر، این سازه را تحت زلزله‌ی نورتریج^۱ با شتاب نگاشت نشان داده شده در شکل ۹ مورد بررسی قرار می‌دهیم. نمودار جابجایی طبقه نهم و دهم این ساختمان در هنگام زلزله فوق مطابق شکل ۱۰ و ۱۱ است. حداکثر اندازه‌ی جابجایی‌ها برای طبقه نهم در حالت بدون کنترل (حالت سازه بدون میراگر) ۰/۵۰۷۰ متر و با میراگر غیرخطی ۰/۳۲۶۱ متر می‌باشد. همچنین این میزان جابجایی‌ها برای طبقه دهم به ترتیب ۰/۵۱۹۱ و ۰/۲۴۸۲ متر است.

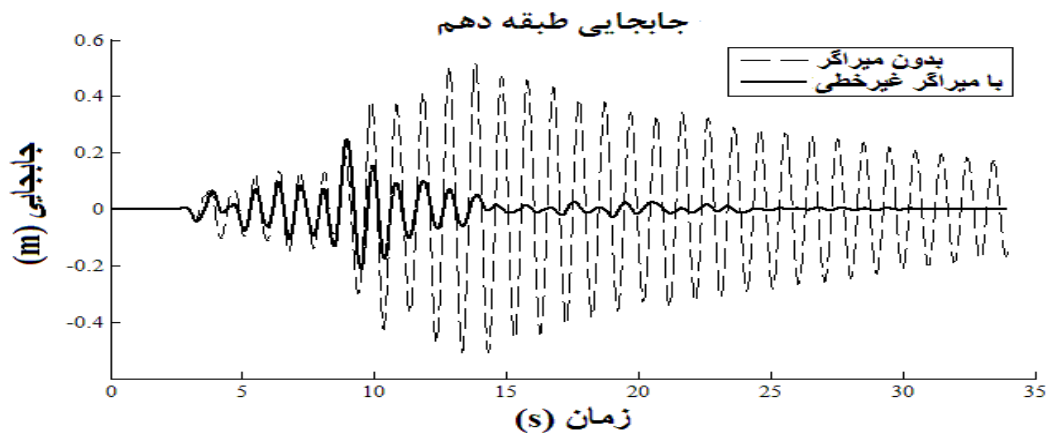
¹ Northridge



شکل ۹. نمودار تاریخچه زمانی زلزله نورتریج



شکل ۱۰. تاریخچه زمانی جابجایی سقف طبقه نهم در هنگام زلزله نورتریج



شکل ۱۱. تاریخچه زمانی جابجایی سقف طبقه دهم در هنگام زلزله نورتریج

با توجه به شکل ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود که بعد از اتمام شتاب زلزله در ثانیه سی‌ام، سازه‌ی بدون میراگر دارای جابجایی‌های زیادی است اما سازه‌ی با میراگر غیرخطی جابجایی‌های خیلی کمی را تحمل می‌کند. در جدول ۲ میزان حداکثر جابجایی طبقات، RMS جابجایی طبقات، میزان حداکثر شتاب و RMS شتاب طبقات در هنگام زلزله نورتریج آورده شده است.

جدول ۲. پاسخ سازه تحت زلزله نورث ریج در حالت های کنترلی مختلف

شماره طبقات	حداکثر جابجایی (m)		RMS جابجایی (mm)		حداکثر شتاب (m/s ²)		RMS شتاب (m/s ²)	
	بدون میراگر	با میراگر	بدون میراگر	با میراگر	بدون میراگر	با میراگر	بدون میراگر	با میراگر
۱	0.0771	0.0540	0.99	0.15	4.34	3.47	2.21	0.55
۲	0.1524	0.1057	3.87	0.59	7.81	6.05	8.03	1.84
۳	0.2241	0.1540	8.38	1.28	10.45	8.71	16.18	3.55
۴	0.2909	0.1978	14.12	2.13	12.58	11.15	25.91	5.56
۵	0.3517	0.2374	20.59	3.07	14.85	13.07	36.55	7.72
۶	0.4048	0.2708	27.20	3.99	16.57	14.25	47.39	9.79
۷	0.4491	0.2972	33.38	4.81	18.80	15.28	57.69	11.62
۸	0.4834	0.3158	38.58	5.43	20.85	16.45	66.72	13.20
۹	0.5070	0.3261	42.33	5.80	22.23	16.98	73.86	14.06
۱۰	0.5191	0.2482	44.30	2.10	22.96	9.07	78.10	4.64

با توجه به جدول فوق میزان کاهش حداکثر جابجایی طبقات، RMS جابجایی طبقات، حداکثر شتاب طبقات و RMS شتاب طبقات برای طبقه نهم به ترتیب ۳۶٪، ۸۶٪، ۲۴٪ و ۸۱٪ و برای طبقه پنجم به ترتیب ۳۲٪، ۸۵٪، ۱۲٪ و ۷۹٪ و برای طبقه اول به ترتیب ۳۰٪، ۸۵٪، ۲۰٪ و ۷۵٪ است.

۵- نتیجه گیری:

در این مقاله یک مدل برای میراگر جرمی با سختی غیرخطی ارائه و سپس با استفاده از نرم افزار MATLAB این میراگر به همراه یک ساختمان بتنی در فضای حالت مدل سازی و تحلیل شد. برای حل معادلات غیر خطی روش نیوتن - رافسون به کار برده شد. نتایج نشان می دهند که در طی زلزله السنترو به طور متوسط کاهش حداکثر جابجایی طبقات برای این سازه ی بتنی ۱۰ طبقه نسبت به حالت بدون میراگر ۴۸٪ می باشد. این کاهش برای RMS جابجایی طبقات، حداکثر شتاب طبقات و RMS شتاب طبقات به ترتیب ۸۶٪، ۲۴٪ و ۶۱٪ است. در طی زلزله نورث ریج، کاهش حداکثر جابجایی طبقات، RMS جابجایی طبقات، حداکثر شتاب طبقات و RMS شتاب طبقات به ترتیب ۳۵٪، ۸۶٪، ۲۲٪ و ۸۰٪ می باشد. همان طور که دیده می شود میراگر جرمی توانسته است به خوبی متغیرهای مورد نظر را کاهش دهد.

منابع:

1. Kareem, A. Kijewski, T. Tamura, Y. "Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications", Journal of Wind and Structures, 2, 3, 201-251, 1999.
2. Ikeda, Y. "Active and semi-active control of buildings in Japan", Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, 4, 3, 278-282, 2004.
3. Lu, X. L. and Jiang, H. J. "Research and practice of response control for tall buildings in mainland china", Journal of Procedia Engineering, 14, 73-83, 2011.
4. Pourzeynali, S. Salimi, S. "Robust multi-objective optimization design of active tuned mass damper system to mitigate the vibrations of a high-rise building" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 229, 1, 1-18, 2015.
5. Bajkowski, J. M. Dyniewicz, B. Bajer, C. I. "Semi active damping strategy for beams system with pneumatically controlled granular structure", Journal of Mechanical Systems and Signal Processing, 70, 387-396, 2015.
6. Sadek, F. Mohraz, B. Taylor, A.W. 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, 617- 635, 1997.

7. Eason, R.P. Sun, C. Dick, A.J. Nagarajaiah, S. "Attenuation of a linear oscillator using a nonlinear and a semi-active tuned mass damper in series", 332, 154-166, 2013.
8. Guo, W. Li, H.N. Liu, G.H. Yu, Z.W. "A simplified optimization strategy for nonlinear tuned mass damper in structural vibration control", Journal of Asian Journal of Control, 14, 5, 1-11, 2012.
9. Venanzi, I. Ierimonti, L. Ubert, F. "An enhanced nonlinear damping approach accounting for system constraints in active mass dampers", 357, 2-15, 2015.
10. Setareh, M. "Application of Semi-Active Tuned Mass Dampers to Base-Excited Systems", John Wiley & Sons, 30, 449-462, 2001.
11. Oller, S. "Nonlinear Dynamics of Structures", Springer, 2014.
12. 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, 383-396, 2013.

Abstract:

Seismic loads are very important in Iran because there are some active faults in the big cities of Iran such as Tehran and Tabriz. Therefore, concrete structures must be resistant against seismic loads. Using a tuned mass damper is one of the best methods to improve the performance of buildings during an earthquake. A tuned mass damper with geometrically nonlinear stiffness was proposed and investigated in this paper. A ten-story concrete building was considered to evaluate the suggested damper. The results of this paper show that the suggested damper decreases the displacements and the accelerations of the building during an earthquake.