

## بهینه‌سازی مشخصه‌های میراگر غیرخطی ویسکوز به‌منظور کاهش پاسخ سازه‌ی بتنی

### با رفتار خطی و غیرخطی

رضا کامگار<sup>۱\*</sup>، محمدرضا بابادایی سامانی<sup>۲</sup>، هیثم حیدرزاده<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، واحد فناور آریان سازه زاگرس، پارک علم و فناوری، شهرکرد، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

#### چکیده

امروزه، کنترل ارتعاشات سازه در حین زلزله و همچنین کاهش پاسخ سازه از اهمیت بالایی برخوردار است. میراگرها یکی از انواع سیستم‌های کنترلی به‌منظور جذب انرژی زلزله و اتلاف آن جهت کاهش پاسخ سازه می‌باشند. هدف اصلی این مقاله، یافتن مشخصه‌های بهینه برای میراگر غیرخطی ویسکوز است که در قاب بتنی یک دهانه سه‌طبقه به‌صورت ضربدری در تمامی طبقات قرار دارد. فرض بر این است که سازه تحت زلزله‌ای مشخص قرار گرفته و هر دو نوع رفتار خطی و غیرخطی حین زلزله برای سازه در نظر گرفته می‌شود. جهت مدل‌سازی قاب بتنی و میراگرهای غیرخطی ویسکوز از نرم‌افزار اپنسیس استفاده می‌شود و پاسخ‌های سازه در گام‌های زمانی متفاوت با استفاده از روش عددی نیومارک، محاسبه می‌شوند. قیدهایی در نظر گرفته شده در حین فرآیند بهینه‌سازی شامل محدوده‌هایی برای پارامترهای میراگر غیرخطی ویسکوز (ضریب میرایی، سختی محوری و توان سرعت) و همچنین بیشینه قدر مطلق مقدار برش پایه می‌باشند و هدف یافتن مقادیر بهینه برای این پارامترها است به‌گونه‌ای که تحت بار زلزله‌های در نظر گرفته شده، بیشینه قدر مطلق جابجایی بام سازه کمینه شود. نتایج نشان می‌دهند که این میراگر جهت کنترل سازه در ناحیه‌ی خطی بسیار مناسب می‌باشد و به ترتیب بیشینه جابجایی بام و بیشینه برش پایه را تحت زلزله‌ی السنترو به میزان  $37/51$  و  $43/39$  درصد کاهش می‌دهد درحالی‌که جهت بهبود رفتار سازه در ناحیه‌ی غیرخطی چندان مناسب نمی‌باشد.

کلمات کلیدی: تحلیل دینامیکی، میراگر غیرخطی ویسکوز، بهینه‌سازی، کنترل ارتعاشات، الگوریتم گرگ‌های خاکستری، اپنسیس.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
10.22065/JSCE.2019.148073.1659	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت	
doi: 10.22065/JSCE.2019.148073.1659	۱۳۹۹/۰۷/۰۱	۱۳۹۹/۰۷/۰۱	۱۳۹۷/۱۰/۲۱	۱۳۹۷/۱۰/۱۹	۱۳۹۷/۰۶/۱۸	
			رضا کامگار	*نویسنده مسئول:		
			kamgar@sku.ac.ir	پست الکترونیکی:		

# Optimization of nonlinear viscous damper characteristics to reduce the response of concrete structures with linear and nonlinear behaviours

Reza Kamgar<sup>\*1</sup>, Mohammad Reza Babadaei Samani<sup>2</sup>, Heisam Heidarzadeh<sup>1</sup>

*1 Department of Civil Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran*

*2 Master of Science of Civil Engineering, Technology Unit of Arian Saze Zagros, Chaharmahal Science and Technology Park, Shahrekord, Iran*

## ABSTRACT

Nowadays, controlling vibration of a structure in earthquakes and reducing the structural responses are of great importance. Dampers are a type of systems controlling the absorption of the earthquake energy and dissipating it in order to reduce the structural responses. The main objective of this paper is to find the optimal characteristics of the nonlinear viscous dampers placed at all storeys in a three-storey single bay concrete frame. It is assumed that the structure is subjected to the Elcentro and Gazli earthquakes; and both linear and nonlinear behaviors are considered for the structure during the earthquakes. OpenSees software is used to model the concrete frame and nonlinear viscous dampers. The structural responses are calculated at different time steps, using Newmark's numerical method. A series of constraints which are considered during the optimization process include the limits for parameters of nonlinear viscous damper (Viscous coefficient, axial stiffness and damper exponent) and the maximum absolute value for base shear. The objective is to find optimal values for these parameters in such a way that the maximum absolute value would be minimized for the roof displacement during the earthquake load. The results show that the nonlinear viscous damper is very suitable to control the structure responses when it has linear behavior. In fact, when the structure is subjected to the Elcentro earthquake, the maximum absolute value of the roof displacement and base shear decrease by 37.51% and 43.39%, respectively. The nonlinear behavior of the concrete frame does not improved considerably when the nonlinear viscous dampers are used to control the nonlinear response of the structure in the earthquake.

## ARTICLE INFO

**Received:** 09 September 2018

**Revised:** 09 January 2019

**Accepted:** 11 January 2019

## Keywords:

*Dynamic analysis, Nonlinear viscous damper, Optimization, Vibration control, Gray wolf algorithm, OpenSees.*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.148073.1659

\*Corresponding author: Reza Kamgar

Email address: kamgar@sku.ac.ir

## ۱- مقدمه

بررسی رفتار لرزه‌ای سازه و مقاومت آن در برابر آسیب‌های ناشی از زلزله، از اصلی‌ترین مسائل در تحقیقات اخیر به شمار می‌رود. اخیراً به منظور افزایش جذب انرژی و بالا بردن کارایی دینامیکی سازه‌ها، از میراگر استفاده می‌شود. میراگرها با جذب مقادیر بالای انرژی، باعث کاهش خرابی‌های لرزه‌ای می‌شوند [۱]. انواع مختلفی از میراگرها وجود دارد که با توجه به عملکردشان، در قسمت‌های مختلف سازه مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند [۲]. میراگر ویسکوز<sup>۱</sup>، یک میراگر وابسته به سرعت<sup>۲</sup> بوده و برخلاف برخی میراگرهای وابسته به جابجایی<sup>۳</sup>، توانایی بالایی در میرایی انرژی در تمامی مراحل ارتعاش سازه (حتی ارتعاش‌های اندک) دارد [۳]. میراگرهای ویسکوز شامل دو نوع خطی و غیرخطی می‌باشند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در جابجایی‌های یکسان، نیروی کمتری در میراگرهای غیرخطی ویسکوز نسبت به میراگرهای خطی آن‌ها به وجود می‌آید. بنابراین نوع غیرخطی این میراگرها عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد [۴].

بعد از زلزله‌ی نورث‌ریج و وقوع خرابی در سازه‌ها، تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با ارائه‌ی راهکارهایی جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها انجام شد. نقی پور و بهرامی المان شکل‌پذیری را جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب خمشی با مهاربند و اگر معرفی نمودند [۵]. محمودی صاحبی و خانجانی نیز از میراگر تسلیمی خمشی به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب خمشی همراه با مهاربند هم‌محور ضربدری استفاده نمودند [۶].

تحقیقات متعددی در زمینه‌ی مدل‌سازی عددی رفتار میراگرهای ویسکوز انجام شده است. به منظور محاسبه‌ی نیروی ایجادشده در میراگرهای خطی، می‌توان از دو پارامتر ضریب میرایی ( $C_d$ ) و توان سرعت ( $\alpha$ ) استفاده نمود [۴]. نتایج تحقیقات یو و همکاران نشان می‌دهد که افزودن پارامتر سختی محوری میراگر جهت مدل‌سازی آن، سبب بهبود دقت نتایج مدل‌سازی عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی می‌شود [۷]. بر همین اساس، آکلیان و همکاران الگوریتمی جهت مدل‌سازی رفتار میراگر غیرخطی ویسکوز پیشنهاد نمودند که علاوه بر پارامترهای ( $C_d$ ) و ( $\alpha$ )، سختی محوری ( $K_d$ ) را نیز در برمی‌گیرد. بررسی نتایج استفاده از این مدل نشان‌دهنده‌ی کارایی و دقت مناسب آن در شبیه‌سازی رفتار میراگرهای غیرخطی ویسکوز می‌باشد [۸].

بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در بهبود عملکرد سازه، اخیراً توسط محققین متعددی مورد توجه قرار گرفته است [۹، ۱۰]. کاوه و قازان از الگوریتم بهینه‌سازی برخورد اجسام و الگوریتم ارتقا یافته‌ی بهینه‌سازی برخورد اجسام در بهینه‌سازی سازه‌های اسکلتی استفاده نمودند [۱۱]. همچنین کاوه و همکاران از الگوریتم جستجوی کوسه جهت کمینه‌سازی وزن سازه‌ی سبده‌ی قاب فولادی استفاده نمودند [۱۲]. اخیراً بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شونده تحت زلزله‌ی بحرانی توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته شده است [۱۳-۱۵]. در مرجع [۱۴]، کامگار و همکاران نشان دادند که الگوریتم گرگ‌های خاکستری توانایی بالایی در بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرمی دارد. امروزه کاربرد الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی به منظور بهینه‌سازی مشخصه‌های مختلف در مهندسی، مورد توجه محققین متفاوتی قرار گرفته شده است. نجف زاده و تفرج نوروز از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات جهت پیش‌بینی ضرایب پراکنندگی طولی در رودخانه استفاده نمودند [۱۶]. خالدی و همکاران نیز بهینه‌سازی چندهدفه‌ی قاب فولادی را با استفاده از الگوریتم NSGA-II به منظور کمینه‌سازی وزن سازه و جابجایی نسبی میان طبقات تحت بار انفجار بررسی نمودند [۱۷]. همچنین خطیبی نیا و یزدانی از الگوریتم جستجوی گرانشی شتاب‌دهی شده‌ی چندهدفه جهت بهینه‌سازی ابعاد سازه‌های خرابایی استفاده نمودند [۱۸]. قلی‌زاده و پورحسینی با استفاده از الگوریتم بهبودیافته‌ی دلفین، بهینه‌سازی چیدمان مهاربندها در قاب فولادی را بررسی نمودند [۱۹].

در این مقاله، بهینه‌سازی مشخصه‌های میراگر غیرخطی ویسکوز که در یک قاب بتنی یک دهانه سه‌طبقه به صورت ضربدری قرار گرفته‌اند، تحت زلزله‌های السنتر و گزلی بررسی می‌شود. جهت مدل‌سازی قاب بتنی و میراگرهای غیرخطی ویسکوز از نرم‌افزار OpenSees [۲۰] استفاده می‌شود و هر دو نوع رفتار خطی و غیرخطی برای سازه در حین زلزله در نظر گرفته می‌شود. همچنین پاسخ‌های

<sup>1</sup> Viscous damper

<sup>2</sup> rate-dependent

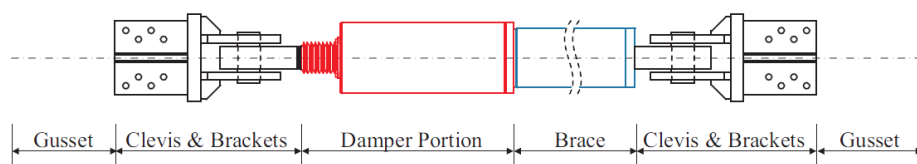
<sup>3</sup> displacement-dependent

سازه در گام‌های زمانی متفاوت با استفاده از روش عددی نیومارک، محاسبه می‌شوند. قیدهایی نیز برای محدوده‌های پارامترهای میراگر غیرخطی ویسکوز (ضریب میرایی، سختی محوری و توان سرعت) و همچنین بیشینه قدر مطلق مقدار برش پایه در نظر گرفته می‌شوند و هدف یافتن مقادیر بهینه برای این پارامترها است به گونه‌ای که تحت بار زلزله‌های در نظر گرفته شده، بیشینه قدر مطلق جابجایی بام سازه کمینه شود. نتایج نشان می‌دهند که این میراگر جهت کنترل سازه در ناحیه‌ی خطی بسیار مناسب می‌باشد و به ترتیب بیشینه جابجایی بام و بیشینه برش پایه را تحت زلزله‌ی السنترو به میزان  $37/51$  و  $43/39$  درصد کاهش می‌دهد در حالی که جهت بهبود رفتار سازه در ناحیه‌ی غیرخطی چندان مناسب نمی‌باشد. چنین روندی نیز در رابطه با زلزله‌ی گزلی مشاهده گردید و به ترتیب بیشینه جابجایی بام و بیشینه برش پایه را به میزان  $1/39$  و  $17/74$  درصد کاهش داد. این امر نشان می‌دهد که این میراگر می‌تواند جهت کاهش بیشینه جابجایی سازه و برش پایه در سازه‌ی با رفتار خطی استفاده شود. گرچه میزان کاهش بیشینه جابجایی سازه در زلزله‌ی گزلی توسط میراگر غیرخطی ویسکوز بسیار ناچیز می‌باشد، اما این میراگر توانسته است میزان برش پایه‌ی سازه را به میزان  $17/74$  درصد کاهش دهد.

## ۲- میراگر ویسکوز غیر خطی

توانایی جذب و استهلاک انرژی در برابر بارهای دینامیکی، یکی از قابلیت‌هایی است که اگر در سازه‌ای موجود باشد، آن سازه رفتار بهتری را در حین زلزله از خود نشان می‌دهد. شکل‌پذیری و جذب انرژی در سازه‌های معمول به وسیله‌ی تسلیم و بروز خرابی در اعضای آن‌ها تأمین می‌شود. این روند در سازه‌های فولادی معمولاً به صورت تشکیل مفاصل پلاستیک بوده، و در سازه‌های بتنی با ایجاد توسعه‌ی ترک‌ها در اعضای بتنی اتفاق می‌افتد. استفاده از میراگرها، روش مناسبی برای تغییر رفتار سازه در برابر بارهای دینامیکی (از حالت تسلیم و خرابی اعضای سازه به حالت استهلاک انرژی) به شمار می‌رود [۱].

امروزه میراگرهای متفاوتی برای قسمت‌های مختلف سازه طراحی شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند که به طور کلی به دو دسته‌ی وابسته به جابجایی و وابسته به سرعت تقسیم‌بندی می‌شوند. میراگرهای اصطکاکی و فلزی-تسلیمی<sup>۴</sup> در دسته‌ی وابسته به جابجایی قرار می‌گیرند. روند استهلاک انرژی در این میراگرها، در درجه‌ی اول وابسته به جابجایی نسبی این اعضا بوده و سختی اولیه‌ای در سازه به وجود می‌آورند [۳]. در مقابل، استهلاک انرژی در میراگرهای وابسته به سرعت، متناسب با سرعت ارتعاش سازه بوده و بنابراین توانایی استهلاک انرژی در تمامی سطوح ارتعاش سازه را دارند [۲۱]. میراگر ویسکوز در دسته میراگرهای وابسته به سرعت قرار می‌گیرد [۳]. این میراگر شامل یک سیلندر و یک پیستون است. درون این میراگر دارای مایع ویسکوز بوده که با اعمال نیرو و تحت فشار قرار گرفتن آن، مایع ویسکوز به ناحیه بین پیستون و سیلندر منتقل شده و به علت ویسکوزیته بالای مایع، باعث استهلاک انرژی می‌گردد [۱]. مشخصات کلی میراگر ویسکوز در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱: جزئیات میراگر غیرخطی ویسکوز [۱۸].

رابطه‌ی کلی نیرو-سرعت میراگر ویسکوز غیرخطی را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود (رابطه ۱).

$$F_d(t) = C_d |u'_d(t)|^\alpha \operatorname{sgn}(u'_d(t)) \quad [22] \quad (1)$$

به گونه‌ای که در رابطه‌ی (۱)،  $C_d$  ضریب میرایی بوده و  $u_d$  جابجایی میراگر است.  $\operatorname{sgn}$  نیز نشان‌دهنده‌ی تابع علامت می‌باشد. همچنین  $\alpha$  توان سرعت بوده که به خصوصیات مایع ویسکوز بستگی دارد. معمولاً برای مقدار  $\alpha$  عددی در بازه‌ی ۰ تا ۲ پیشنهاد شده

<sup>4</sup> metallic yielding

است، به طوری که حالت  $\alpha = 1$  معرف میراگر خطی بوده و در حالت  $\alpha = 0$ ، منحنی هیستریزس نیرو-جابجایی به شکل مستطیلی تبدیل می شود که این حالت در میراگرهای اصطکاکی قابل مشاهده است [۸]. در طراحی لرزه ای سازه ها، نظر به اینکه تمایل به محدود نمودن نیروی میراگر تحت پالس های با سرعت بالا وجود دارد، توصیه می شود که مقدار  $\alpha$  کمتر از یک در نظر گرفته شود [۸].

طبق تحقیقات انجام گرفته توسط یو و همکاران، در نظر گرفتن سختی محوری در مدل سازی میراگر غیرخطی ویسکوز موجب بهبود دقت نتایج عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی می شود [۷]. بر این اساس، در مدل ارائه شده توسط آکلین و همکاران، سختی محوری به صورت رابطه ی (۲) ارائه شده است [۸].

$$\frac{1}{K_s} = \frac{1}{K_d} + \frac{1}{K_b} + \frac{2}{K_{cl}} + \frac{2}{K_{gus}}$$

$$F_d(t) = F_s(t) = K_s u_s(t)$$

$$u_m(t) = u_s(t) + u_d(t)$$

$$\dot{u}_m(t) = \dot{u}_s(t) + \dot{u}_d(t) \quad [۸] \quad (۲)$$

$$F_d'(t) = \left( \dot{u}_m(t) - \text{sgn}(F_d(t)) \left( \frac{|F_d(t)|}{C_d} \right) \right) 1/\alpha K_s$$

$$F_d(t_0) = F_0$$

در رابطه ی (۲)،  $K_s$ ،  $K_b$ ،  $K_{cl}$  و  $K_{gus}$  به ترتیب نشان دهنده ی سختی محوری معادل، سختی مهاربند فولادی، سختی اتصال و سختی صفحه ی انتهایی می باشند. همچنین  $u_m$ ،  $u_d$  و  $u_s$  به ترتیب مقادیر جابجایی کل، جابجایی میراگر و جابجایی فنر را در مدل سازی مشخص می کنند. مقادیر سرعت کل، سرعت میراگر و سرعت فنر نیز با  $\dot{u}_m$ ،  $\dot{u}_d$  و  $\dot{u}_s$  مشخص می شوند [۸]. در این مقاله، از روابط فوق جهت مدل سازی رفتار میراگر غیرخطی ویسکوز استفاده می گردد.

### ۳- الگوریتم بهینه سازی گرگ های خاکستری

الگوریتم گرگ های خاکستری، جزء الگوریتم های فرا ابتکاری جدیدی است که الهام گرفته شده از روند طبیعی شکار گرگ های خاکستری می باشد. این روش بر اساس سه گام اصلی شکار، شامل جستجو، محاصره و حمله برای چهار گرگ خاکستری آلفا، بتا، دلتا و امگا ایجاد شده است [۲۳-۲۵]. در طراحی الگوریتم بهینه سازی، سلسله مراتب اجتماعی گرگ ها نیز در نظر گرفته می شود. اولین حل، به عنوان آلفا در نظر گرفته شده و متعاقباً دومین و سومین حل به ترتیب به عنوان بتا و دلتا شناخته می شوند. باقیمانده ی کاندیداهای حل به عنوان امگا در نظر گرفته خواهند شد. گرگ های  $\bar{Y}$  این سه گرگ را دنبال می کنند. بنابراین، رفتار محاصره کنندگی گرگ های خاکستری به صورت رابطه ی (۳) مدل می شود.

$$E = \left| \mathbf{X} \cdot \bar{Y}_p(l) - \bar{Y}(l) \right| \quad (۳)$$

$$\bar{Y}(l+1) = \bar{Y}_p(l) - B \cdot E$$

به گونه ای که در رابطه ی (۳)،  $B$  و  $X$  بردارهای ضرایب می باشند، و  $\bar{Y}_p$  بردار موقعیت مجروحین است. بردارهای  $B$  و  $X$  می توانند به کمک رابطه ی (۴) محاسبه شوند.

$$B = 2ar_1 - a$$

$$X = 2r_2 \quad (۴)$$

در رابطه‌ی (۴)، پارامتر  $a$  به صورت خطی از مقدار دو تا صفر در طول تکرارها کاهش می‌یابد. همچنین  $r_1$  و  $r_2$  بردارهایی تصادفی می‌باشند که در بازه‌ی [۰,۱] قرار دارند. در روند الگوریتم گرگ‌های خاکستری، سه بهترین حل اول ذخیره شده و دیگر گرگ‌ها (شامل گرگ امگا) را مجبور به بروز رسانی موقعیتشان بر اساس بهترین پاسخ در فضای حل می‌کند. برای این منظور، روابط (۵) به کار برده می‌شوند.

$$\begin{aligned} E_{\alpha} &= |X_1 \bar{Y}_{\alpha} - \bar{Y}| \\ E_{\beta} &= |X_2 \bar{Y}_{\beta} - \bar{Y}| \\ E_{\delta} &= |X_3 \bar{Y}_{\delta} - \bar{Y}| \\ \bar{Y}_1 &= \bar{Y}_{\alpha} - B_1 \cdot E_{\alpha} \\ \bar{Y}_2 &= \bar{Y}_{\beta} - B_2 \cdot E_{\beta} \\ \bar{Y}_3 &= \bar{Y}_{\delta} - B_3 \cdot E_{\delta} \\ \bar{Y}(l+1) &= \frac{\bar{Y}_1(l) + \bar{Y}_2(l) + \bar{Y}_3(l)}{3} \end{aligned} \quad (5)$$

در نهایت موقعیت نهایی به صورت موقعیت تصادفی درون دایره‌ای بوده که بر اساس موقعیت‌های آلفا، بتا و دلتا در فضای جستجو تعریف می‌شود. در این مقاله، تعداد بیست آنالیز مستقل انجام شده و در نهایت پارامترهایی که منجر به بهترین پاسخ می‌شوند به عنوان پارامترهای بهینه در نظر گرفته می‌شوند.

## ۴- مدل سازی عددی

### ۴-۱- معادلات حرکت سازه

معادلات حرکت حاکم بر سیستم چند درجه آزادی غیر ارتجاعی را می‌توان به فرم زیر نوشت:

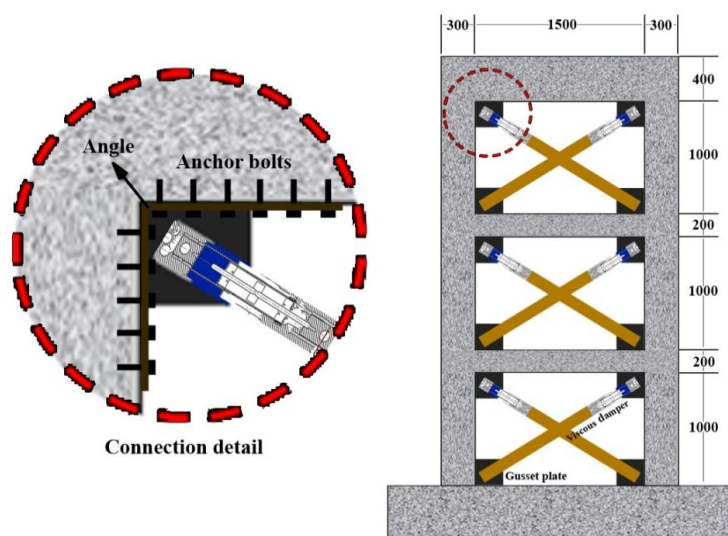
$$[M] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + \{f_s(x)\} = \{P(t)\} \quad (6)$$

به گونه‌ای که  $[M]$  و  $[C]$  به ترتیب ماتریس‌های جرم و میرایی سازه می‌باشند و بردارهای  $\{\dot{x}\}$ ،  $\{\ddot{x}\}$ ،  $\{f_s(x)\}$  و  $\{P(t)\}$  به ترتیب بردارهای سرعت، شتاب، نیروی داخلی فنر و نیروهای خارجی وارد بر سازه در یک مجموعه‌ی گسسته می‌باشند. جهت حل معادله‌ی (۶) از روش‌های عددی گام‌به‌گام زمانی استفاده می‌شود که در این مقاله از روش انتگرال‌گیری عددی گام‌به‌گام نیوتن-رافسون با شتاب خطی استفاده می‌شود [۲۶]. در صورتی که سیستم رفتار خطی از خود نشان دهد، بردار  $\{f_s(x)\}$  با  $[K] \{x\}$  جایگزین می‌شود که در آن،  $[K]$  ماتریس سختی سیستم و  $\{x\}$  بردار جابجایی را نشان می‌دهد.

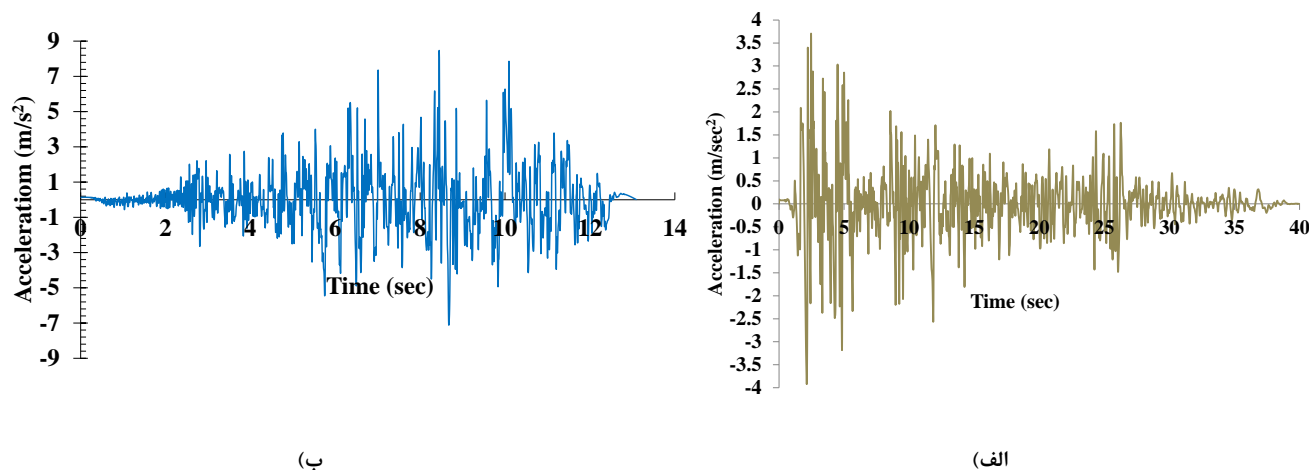
### ۴-۲- مدل سازی قاب بتنی مجهز به میراگر غیرخطی ویسکوز

در این مقاله قاب بتنی یک دهانه و سه طبقه نشان داده شده در شکل (۲) همراه با میراگر غیرخطی ویسکوز تحت شتاب افقی زلزله‌های السنترو و گزلی (شکل ۳) قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که قاب مورد مطالعه، از مرجع [۲۷] انتخاب شده است. قاب مورد مطالعه شامل شش ستون و سه تیر بتن‌آرمه بوده که مشخصات آن در جدول (۱) نشان داده شده است. جهت مدل‌سازی قاب از نرم‌افزار OpenSees استفاده می‌شود. همچنین جهت اتصال میراگر ویسکوز غیرخطی به قاب از اتصال پیشنهاد شده توسط مرجع [۲۸] استفاده می‌شود. در این

نوع اتصال، میراگر غیرخطی به صفحه‌ی بادبندی متصل شده و این مجموعه توسط جوش به یک نبشی متصل می‌شوند. در نهایت این مجموعه توسط میل‌مهاری که در ناحیه‌ی اتصال در اعضای قاب (تیر و ستون) مدفون شده‌اند، به سازه متصل می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲: مشخصات قاب بتنی مورد مطالعه و نحوه‌ی اتصال میراگر غیرخطی ویسکوز به آن.



شکل ۳: نمودار تاریخچه زمانی شتاب زلزله الف) الاسترو ب) گزلی.

برای مدل‌سازی مصالح بتنی و فولادی به ترتیب از *Concret01* و *Hysteretic* استفاده می‌شود [۲۰]. همچنین المان‌های تیر و ستون با استفاده از *nonlinearBeamColumn* برای رفتار غیرخطی و برای رفتار خطی با استفاده از المان *ElasticBeamColumn* مدل‌سازی می‌شوند. تمامی گره‌ها در جهت عمود بر صفحه مقید شده و بار زلزله به پای سازه که گیردار است، اعمال می‌شود. همچنین در هر طبقه دو میراگر غیرخطی ویسکوز به صورت ضربدری مطابق شکل (۲) قرار دارد. لازم به ذکر است که به منظور مدل‌سازی رفتار میراگرها از مصالح تک‌محوره‌ی *ViscousDamper* و نیز از المان *twoNodeLink* استفاده می‌شود [۸].

جدول ۱: مشخصات مقاطع قاب بتنی

Dimension (mm)	Rebar properties		
	Diameter (mm)	Number	Yield stress (MPa)
Columns	۲۲	۶	۴۴۰
300×300	۲۵	۲	۴۴۰
Beams	۱۶	۴	۴۷۱
300×200			

ماتریس میرایی سازه نیز به صورت راییلی با نسبت میرایی ( $\xi$ ) برابر با ۰/۰۵ و بر اساس فرکانس‌های مود اول ( $\omega_1$ ) سازه به صورت ماتریس میرایی با نسبت جرمی و بر اساس رابطه‌ی (۷) محاسبه می‌شود [۲۶].

$$[C] = \alpha [M] \quad [26]$$

$$\alpha = 2\xi\omega_1$$

هدف اصلی این مقاله بررسی تأثیر رفتار خطی و غیرخطی سیستم قاب بتنی و تعیین مقادیر بهینه برای میراگر غیرخطی ویسکوز به منظور کاهش پاسخ جابجایی و برش پایه سازه می‌باشد. حل معادله‌ی (۶)، با استفاده از روش عددی نیومارک با شتاب خطی انجام می‌شود. کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB و OpenSees انجام شده و مقادیر بهینه برای سختی محوری ( $K_d$ )، ضریب میرایی ( $C_d$ ) و توان میرایی ( $\alpha$ ) تحت قیود معادله‌ی (۸) محاسبه می‌شوند. لازم به ذکر است که حدود فوقانی و تحتانی برای پارامترهای میراگر غیرخطی ویسکوز بر اساس مرجع [۸] انتخاب شده‌اند.

مطابق توضیحات ارائه شده در بخش ۳، جهت یافتن مقدار بهینه برای پارامترهای میراگر غیرخطی ویسکوز از الگوریتم گرگ‌های خاکستری استفاده می‌شود. معادله‌ی (۸) تابع هدف و قیود مورد استفاده جهت بهینه‌سازی را نشان می‌دهند.

Find :  $K_d, C_d, \alpha$

$$\text{Minimize : Disp ratio} = \left| \frac{x_{\max \text{ With NVD}}}{x_{\max \text{ Without NVD}}} \right|$$

$$\text{Subjected to : } \begin{cases} 0.01 \leq \alpha < 1.00 \\ 5 \leq K_d \leq 50 \text{ (N/m)} \\ 2 \leq C_d \leq 25 \text{ (N.sec/m)} \\ 0.5 \leq \text{Shear force ratio} = \frac{V_{x \text{ With NVD}}}{V_{x \text{ Without NVD}}} \leq 0.9 \end{cases} \quad (8)$$

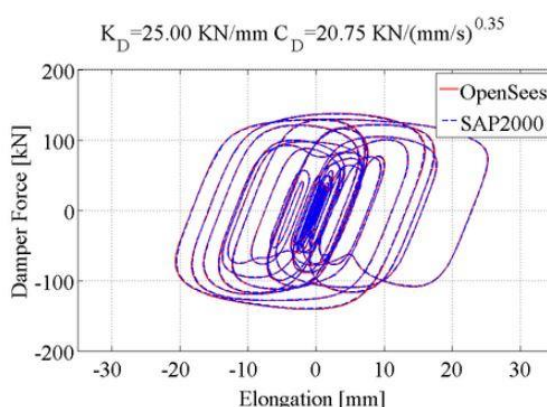
به گونه‌ای که در معادله‌ی (۸)،  $x_{\max \text{ With NVD}}$ ،  $x_{\max \text{ Without NVD}}$ ،  $V_{x \text{ With NVD}}$  و  $V_{x \text{ Without NVD}}$  به ترتیب مقادیر بیشینه قدر مطلق جابجایی بام سازه با و بدون میراگر غیرخطی ویسکوز و همچنین بیشینه قدر مطلق برش پایه با و بدون میراگر غیرخطی ویسکوز را نشان می‌دهند.



## ۵- بررسی پاسخ قاب بتنی مجهز به میراگر غیرخطی ویسکوز بهینه شده

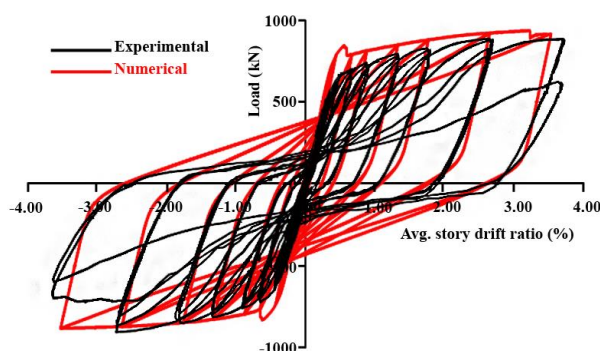
### ۵-۱- صحت سنجی

به منظور صحت سنجی مدل سازی میراگر غیرخطی ویسکوز، قاب یک دهانه یک طبقه ای که با استفاده از میراگر غیرخطی ویسکوز تقویت شده و در مرجع [۲۹] نیز صحت سنجی آن انجام شده است، انتخاب و نتایج به دست آمده از OpenSees با نتایج نرم افزار SAP مقایسه می شوند. طول دهانه ی قاب مورد بررسی ۵ متر و ارتفاع آن ۳ متر می باشد که دارای زمان تناوب طبیعی برابر با ۰/۷ ثانیه است. سختی جانبی سازه ۸/۲۱ ( $kN/mm$ ) و جرم سازه نیز ۰/۱۰۱۹ ( $kN.sec^2/mm$ ) در نظر گرفته می شوند. مقادیر  $K_d$ ،  $C_d$  و  $\alpha$  نیز به ترتیب برابر با ( $kN/mm$ ) ۲۵، ( $kN.sec/mm$ ) ۲۰/۷۴۵۲ و ۰/۳۵ در نظر گرفته می شوند. مقایسه ی نتایج حاصل از مدل سازی در نرم افزارهای OpenSees و SAP در شکل (۴) نشان داده شده است که حاکی از دقت بالای مدل سازی میراگر غیرخطی ویسکوز می باشد.



شکل ۴: مقایسه ی نمودار نیرو-جابجایی در میراگر غیرخطی ویسکوز مطابق مرجع [۲۹].

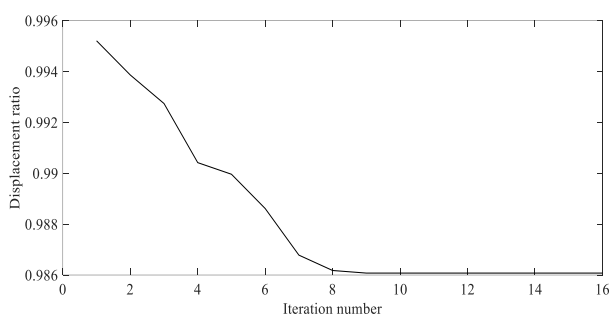
همچنین جهت صحت سنجی مدل سازی قاب سه طبقه ی در نظر گرفته شده مطابق مرجع [۲۷]، صحت سنجی تحت بار چرخه ای انجام گرفته و نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی در شکل (۵) مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که مدل سازی به خوبی توانسته است نتایج نمونه ی آزمایشگاهی را پیش بینی نماید.



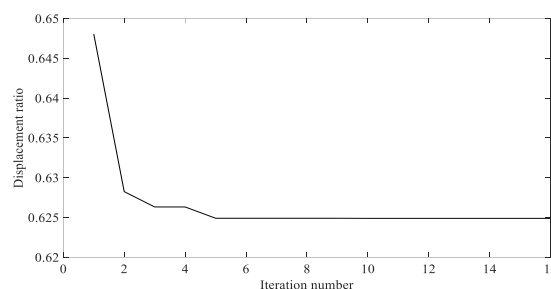
شکل ۵: نمودار نیرو-جابجایی تحت بار چرخه ای.

## ۲-۵- رفتار خطی

مطابق توضیحات بخش‌های قبل، سازه‌ی قاب بتنی مجهز به میراگر غیرخطی ویسکوز تحت زلزله‌های السنتر و گزلی قرار گرفته و مقادیر بهینه برای سختی محوری، ضریب میرایی و توان میرایی بر اساس تابع هدف و قیود در نظر گرفته شده در معادله‌ی (۸) محاسبه می‌شوند. جدول (۲) مقادیر بهینه‌ی پارامترهای میراگر غیرخطی ویسکوز به همراه مقادیر نسبت بیشینه قدر مطلق جابجایی بام سازه‌ی کنترل شده به کنترل نشده (Disp ratio) و همچنین نسبت بیشینه قدر مطلق برش پایه‌ی سازه‌ی کنترل شده به کنترل نشده (Shear force ratio) را برای سازه‌ی با رفتار خطی نشان می‌دهد. همچنین شکل (۶)، نمودار همگرایی پاسخ مربوط به زلزله‌های السنتر و گزلی را تحت الگوریتم گرگ‌های خاکستری نشان می‌دهد.



(ب)



(ف)

شکل ۶: نمودار همگرایی پاسخ تابع هدف در مقابل تعداد تکرارها برای سازه‌ی با رفتار خطی تحت زلزله‌ی الف) السنتر و ب) گزلی.

جدول ۲: مقادیر بهینه‌ی پارامترهای میراگر غیرخطی ویسکوز به همراه پاسخ سازه‌ی خطی

Earthquake	$K_d$ (kN/mm)	$C_d$ (kN.sec/mm)	$\alpha$	Disp ratio	Shear force ratio
Elcentro	۴۰	۲۰	۰/۷۵۵۳	۰/۶۲۴۹	۰/۵۶۶۱
Gazli	۴۰	۲	۰/۹۹	۰/۹۸۶۱	۰/۸۰۲۶

با توجه به نتایج جدول (۲) مشخص است که مقادیر بهینه برای پارامترهای میراگر غیرخطی ویسکوز با توجه به قیود معرفی شده (معادله‌ی ۸) به گونه‌ای محاسبه شده‌اند که مقادیر Disp ratio و Shear force ratio با توجه به رفتار خطی سازه کاهش یافته‌اند. همچنین مقادیر بیشینه قدر مطلق جابجایی و برش پایه‌ی سازه‌ی کنترل شده و کنترل نشده به همراه درصد کاهش پاسخ در جداول (۳-۴) نشان داده شده است. با توجه به جداول (۳-۴) مشخص است که این دو پارامتر به ترتیب به میزان ۳۷/۵۱ و ۴۳/۳۹ درصد برای زلزله‌ی السنتر و به میزان ۱/۳۹ و ۱۷/۷۴ درصد برای زلزله‌ی گزلی کاهش یافته‌اند. این امر نشان می‌دهد که این میراگر می‌تواند جهت کاهش بیشینه جابجایی سازه و برش پایه در سازه‌ی با رفتار خطی استفاده شود اگرچه میزان کاهش بیشینه جابجایی سازه در زلزله‌ی گزلی توسط میراگر غیرخطی ویسکوز بسیار ناچیز می‌باشد، اما باین وجود این میراگر توانسته است میزان برش پایه‌ی سازه را به میزان ۱۷/۷۴ درصد کاهش دهد.

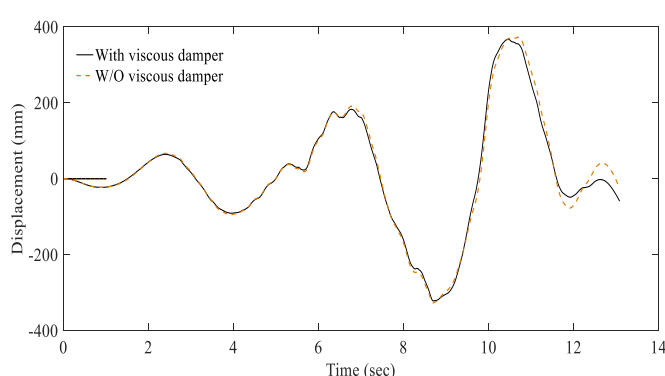
جدول ۳: بیشینه قدر مطلق جابجایی بام سازه‌ی خطی کنترل شده و کنترل نشده به همراه درصد کاهش

Earthquake	$\max  x(t) _{without\ NVD}$ (mm)	$\max  x(t) _{with\ NVD}$ (mm)	Reduction percentage
Elcentro	۲۹۸/۷۴	۱۸۱/۰۵	-/۰.۳۷/۵۱
Gazli	۳۶۷/۴۶۵	۳۷۲/۶۵۴	-/۰.۱/۳۹

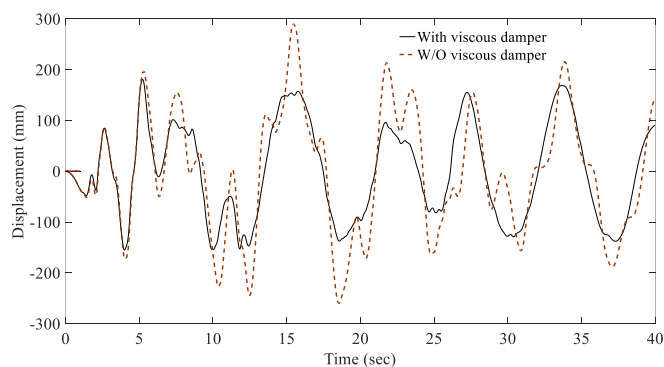
جدول ۴: بیشینه قدر مطلق برش پایه‌ی سازه‌ی خطی کنترل شده و کنترل نشده به همراه درصد کاهش

Earthquake	$\max  V(t) _{without\ NVD}$ (kN)	$\max  V(t) _{with\ NVD}$ (kN)	Reduction percentage
Elcentro	۲۴۷۸۸/۱	۱۴۰۳۱/۶۳	-/۰.۴۳/۳۹
Gazli	۱۶۷۳۷/۸	۲۰۸۵۳/۹۷	-/۰.۱۹/۷۴

همچنین اشکال (۷-۸)، نمودارهای تاریخچه زمانی جابجایی بام سازه و برش پایه تحت زلزله‌های السنترو و گزلی را نشان می‌دهند. با توجه به شکل (۷-الف) مشخص است که تحت زلزله‌ی السنترو، نه تنها بیشینه جابجایی سازه که در یک زمان خاص اتفاق می‌افتد کاهش یافته است، جابجایی سازه نیز به طور کلی با وجود میراگر غیرخطی ویسکوز بهینه شده کاهش یافته است. این روند کاهش در نمودار شکل (۸-الف) که مربوط به بیشینه برش پایه تحت زلزله‌ی السنترو است نیز مشاهده می‌شود. همچنین با توجه به شکل (۷-ب) مشخص است که تحت زلزله‌ی گزلی، تنها مقدار بیشینه جابجایی سازه که در یک زمان خاص اتفاق می‌افتد به مقدار جزئی‌ای کاهش یافته است در حالی که با توجه به شکل (۸-ب) مشخص است که نه تنها بیشینه برش پایه تحت زلزله‌ی گزلی کاهش یافته است بلکه تقریباً در تمام مدت زمان تحلیل مقدار برش پایه کاهش یافته است. بنابراین می‌توان گفت که در نهایت میراگر غیرخطی ویسکوز توانسته است مقدار نیروی داخلی سازه ناشی از برش زلزله را کاهش دهد.

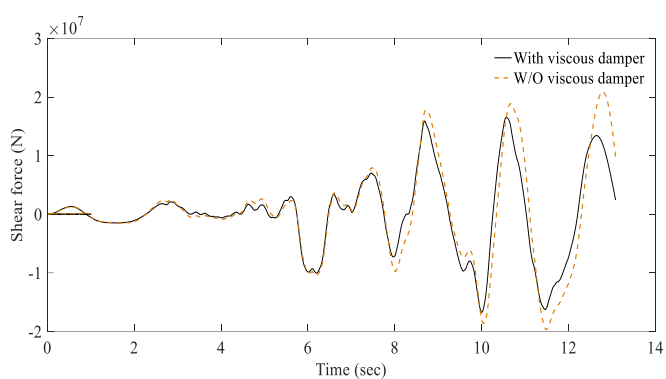


(ب)

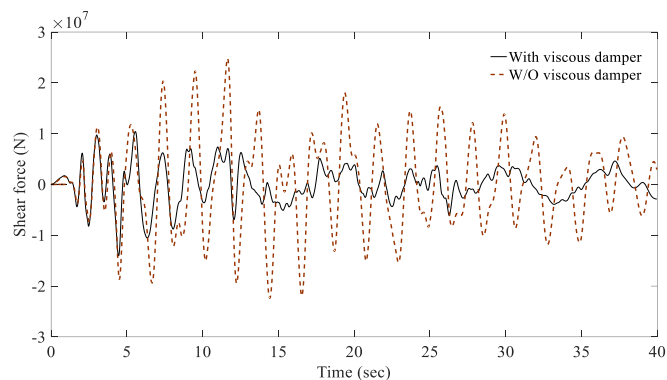


(الف)

شکل ۷: نمودار تاریخچه زمانی جابجایی بام سازه‌ی خطی کنترل نشده و کنترل شده تحت زلزله‌ی الف) السنترو ب) گزلی.



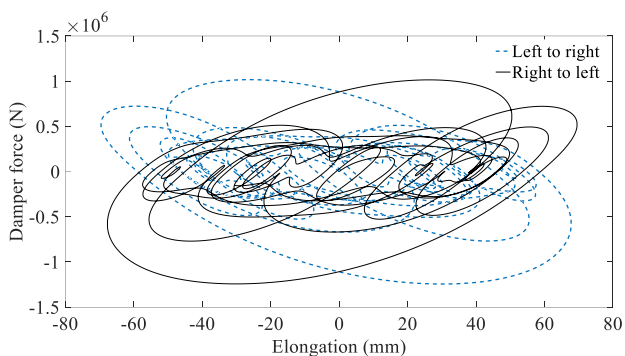
(ب)



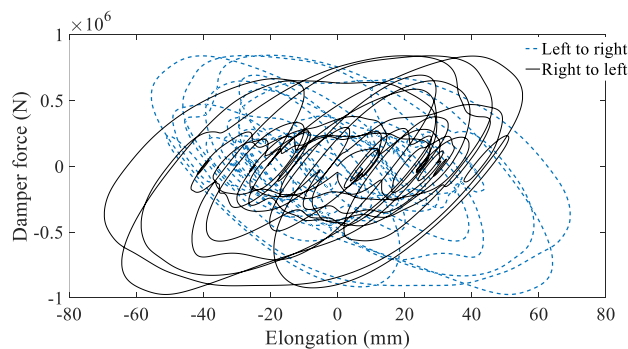
(ف)

شکل ۸: نمودار تاریخچه زمانی برش پایه‌ی سازه‌ی خطی کنترل نشده و کنترل شده تحت زلزله‌ی الف) السنترو ب) گزلی.

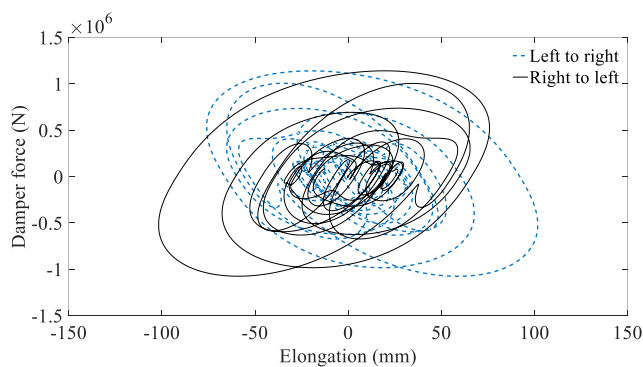
در اشکال (۹) نمودارهای هیستریزس جابجایی میراگر ویسکوز در مقابل نیروی میرایی تحت زلزله‌های السنترو و گزلی ترسیم شده است. جدول (۵) نیز مقدار جذب انرژی را در میراگرهای قرار گرفته در طبقات سازه تحت زلزله‌ی السنترو و گزلی بر اساس موقعیتشان نشان می‌دهد.



(ب)

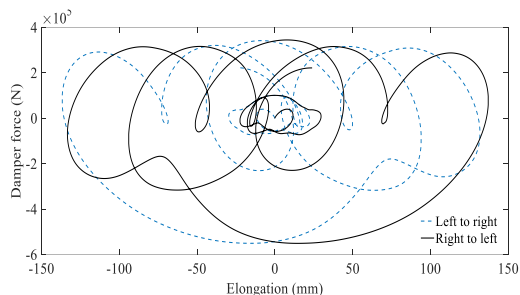


(ف)

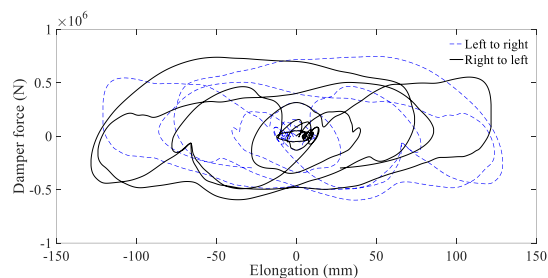


(ج)

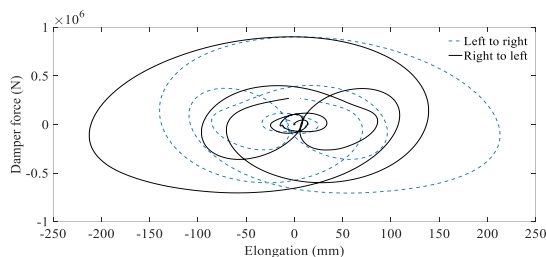
السنترو



(ب)



(الف)



(ج)

گزلی

شکل ۹: نمودار تغییرات نیروی میرایی طبقات مختلف در مقابل جابجایی میراگر برای میراگر غیرخطی ویسکوز قرار گرفته در سازه‌ی با رفتار خطی (الف) طبقه‌ی اول (ب) طبقه‌ی دوم (ج) طبقه‌ی سوم.

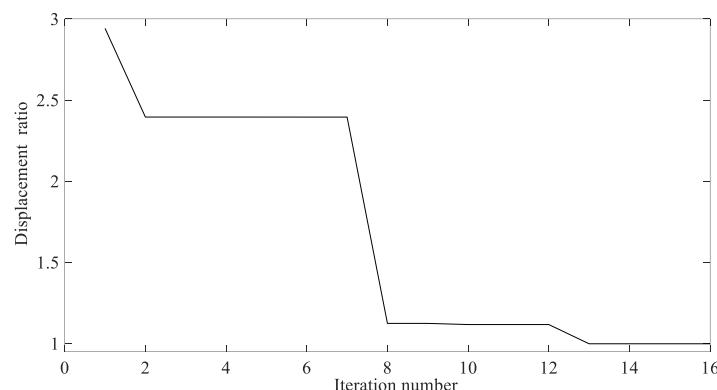
جدول ۵: مقادیر جذب انرژی در میراگرهای ویسکوز غیرخطی

مقدار جذب انرژی			
(kJ)			
Earthquake	شماره طبقه	Left to right	Right to left
Elcentro	اول	۷۱۷/۰۵	۷۱۷/۲۲
	دوم	۵۷۷/۰۸	۵۷۶/۵۳
	سوم	۸۸۲/۶۱	۸۸۲/۳۶
Gazli	اول	۵۰۹/۳۴	۵۰۴/۴۹
	دوم	۲۴۸/۸۱	۲۵۱/۵۷
	سوم	۶۷۴/۸۱	۶۷۱/۴۸

بر اساس جدول (۵) مشخص است که تحت هر دو زلزله، بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به میراگرهای قرار گرفته در طبقه‌ی سوم بوده است و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در تحلیل خطی، قرارگیری میراگر غیرخطی ویسکوز در بالاترین طبقه منجر به جذب انرژی بیشتری خواهد داشت.

## ۳-۵- رفتار غیرخطی

در این قسمت، سازه‌ی قاب بتنی با رفتار غیرخطی مجهز به میراگر غیرخطی ویسکوز تحت زلزله‌ی السنترو و گزلی قرار گرفته و مقادیر بهینه برای سختی محوری، ضریب میرایی و توان میرایی بر اساس تابع هدف و قیود در نظر گرفته شده در معادله‌ی (۸) محاسبه می‌شوند. جدول (۶) مقادیر بهینه‌ی پارامترهای میراگر غیرخطی ویسکوز به همراه مقادیر Disp ratio و Shear force ratio را برای سازه‌ی با رفتار غیرخطی تحت هر دو زلزله‌ی در نظر گرفته شده نشان می‌دهد. شکل (۱۰) نیز نمودار همگرایی پاسخ سازه‌ی غیرخطی تحت زلزله‌ی السنترو با استفاده از الگوریتم گرگ‌های خاکستری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: نمودار همگرایی پاسخ تابع هدف در مقابل تعداد تکرارها برای سازه‌ی با رفتار غیرخطی تحت زلزله‌ی السنترو.

جدول ۶: مقادیر بهینه‌ی پارامترهای میراگر غیرخطی ویسکوز به همراه پاسخ سازه‌ی غیرخطی

Earthquake	$K_d$ (kN/mm)	$C_d$ (kN.sec/mm)	$\alpha$	Disp ratio	Shear force ratio
Elcentro	۳۲/۷۴	۲/۳۵۸۹	۰/۰۱۱۳	۰/۹۹۸۰	۱/۰۰۷۶
Gazli	۲۴/۲	۲/۷۷۸۵	۰/۱۲	۰/۹۹۷۲	۰/۹۸۶۵

با توجه به نتایج جدول (۶) مشخص است که مقادیر بهینه برای پارامترهای میراگر غیرخطی ویسکوز با توجه به قیود معرفی شده (معادله‌ی ۸) به گونه‌ای محاسبه شده است که مقدار Disp ratio با توجه به رفتار غیرخطی سازه کاهش یافته است. البته با توجه به عدم کاهش قابل ملاحظه در بیشینه جابجایی سازه، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که این سیستم عملکرد مناسبی در کاهش بیشینه جابجایی سازه ندارد. مقادیر بیشینه قدر مطلق جابجایی و برش پایه‌ی سازه‌ی کنترل شده و کنترل نشده تحت زلزله‌های در نظر گرفته شده به همراه درصد کاهش پاسخ در جداول (۷-۸) نشان داده شده است. با توجه به جداول (۷-۸) مشخص است که پاسخ بیشینه‌ی (جابجایی بام و برش پایه) سازه‌ی کنترل شده در رفتار غیرخطی سازه کاهش چشمگیری نداشته و اساساً وجود میراگر غیرخطی ویسکوز تأثیر چندانی در کاهش بیشینه پاسخ‌های در نظر گرفته شده نداشته است.

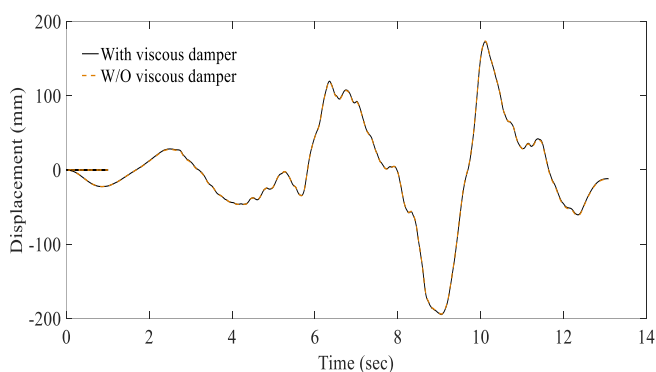
جدول ۷: بیشینه قدر مطلق جابجایی بام سازه‌ی غیرخطی کنترل شده و کنترل نشده به همراه درصد کاهش

Earthquake	$\max  x(t) _{without\ NVD}$ (mm)	$\max  x(t) _{with\ NVD}$ (mm)	Reduction percentage
Elcentro	۱۶۷/۱۱۰۰	۱۶۶/۷۷۷۰	-٪۰/۱۹۹۳
Gazli	۱۹۴/۶۵۲۰	۱۹۴/۱۱۱۰	-٪۰/۲۷۷۹

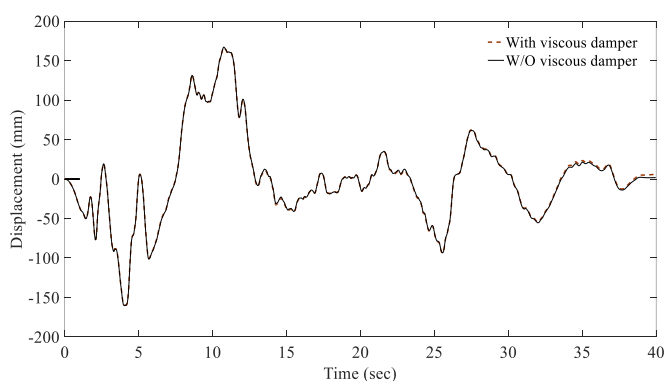
جدول ۸: بیشینه قدر مطلق برش پایه‌ی سازه‌ی غیرخطی کنترل شده و کنترل نشده به همراه درصد کاهش

Earthquake	$\max  V(t) _{without\ NVD}$ (kN)	$\max  V(t) _{with\ NVD}$ (kN)	Reduction percentage
Elcentro	۵۳۶/۳۲۵	۵۴۰/۴۲۴	+٪۰/۷۶۴۳
Gazli	۵۵۰/۷۴۴	۵۴۲/۲۹۲	-٪۱/۳۵۳۱

همچنین اشکال (۱۱-۱۲)، نمودارهای تاریخچه زمانی جابجایی بام سازه و برش پایه تحت زلزله‌های السنترو و گزلی را نشان می‌دهند. این اشکال نیز نشان می‌دهند که تحت هر دو زلزله‌ی مورد مطالعه، نه تنها بیشینه پاسخ سازه که در یک زمان خاص اتفاق می‌افتد کاهش چشمگیری نداشته است، بلکه پاسخ سازه به طور کلی با وجود میراگر غیرخطی ویسکوز بهینه شده کاهش مناسبی در کل زمان تحلیل نیز نداشته است.

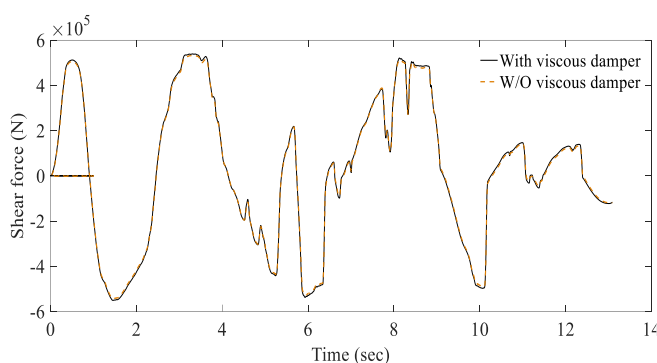


(ب)

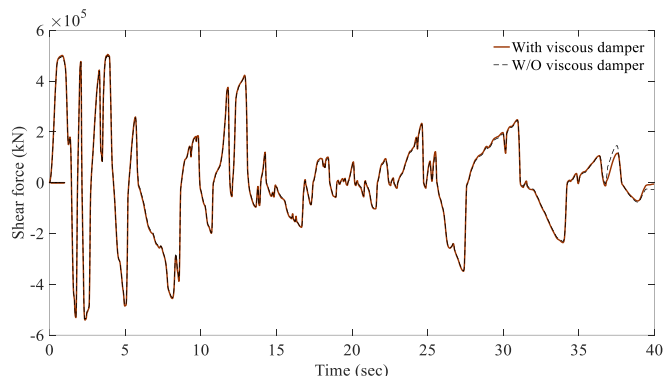


(ف)

شکل ۱۱: نمودار تاریخچه زمانی جابجایی بام سازه‌ی کنترل نشده و کنترل شده با رفتار غیرخطی تحت زلزله‌های الف) السنترو و ب) گزلی.



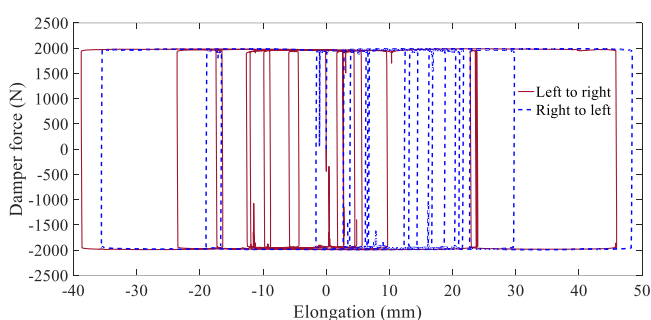
(ب)



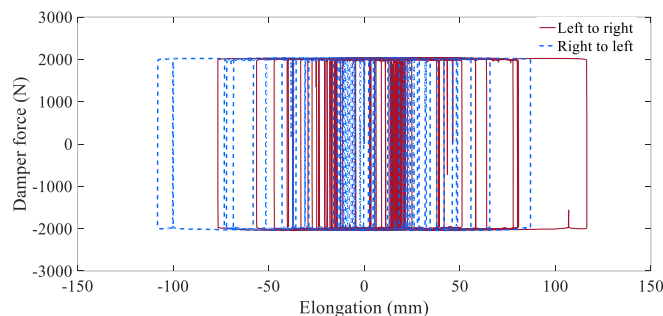
(الف)

شکل ۱۲: نمودار تاریخچه زمانی برش پایه‌ی سازه‌ی کنترل نشده و کنترل شده با رفتار غیرخطی تحت زلزله‌های الف) السنترو ب) گزلی.

در اشکال (۱۳)، نمودارهای هیستریزس جابجایی میراگر ویسکوز در مقابل نیروی میرایی برای میراگر غیرخطی ویسکوز تحت زلزله‌های السنترو و گزلی ترسیم شده است. جدول (۹) نیز مقدار جذب انرژی را در میراگرهای قرار گرفته در طبقات سازه بر اساس موقعیتشان تحت زلزله‌های در نظر گرفته شده نشان می‌دهد. بر اساس اشکال (۱۳) و نیز جدول (۹) می‌توان نتیجه‌گیری نمود که میزان جذب انرژی توسط میراگر غیرخطی ویسکوز بر اساس رفتار غیرخطی نسبت به رفتار خطی سازه بسیار ناچیز بوده و عملاً کارایی مناسبی نداشته است. همچنین با توجه به اشکال (۹ و ۱۳) می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با تغییر رفتار سازه از ناحیه‌ی خطی به غیرخطی، میراگر غیرخطی ویسکوز با کاهش شدید مقدار توان سرعت  $(\alpha)$ ، با تغییر رفتار به سمت رفتار میراگر اصطکاکی سعی در کنترل پاسخ سازه می‌نماید که در مقایسه با عملکرد میراگر در بهبود رفتار خطی سازه، چندان کارآمد نیست. در حقیقت تحت هر دو زلزله‌ی مورد مطالعه، رفتار اصطکاکی مدل میراگر اصطکاکی که توسط پال و مارش [۳۰] معرفی شد، در رفتار میراگر ویسکوز غیرخطی نصب شده بر سازه‌ی با رفتار غیرخطی مشاهده می‌شود.

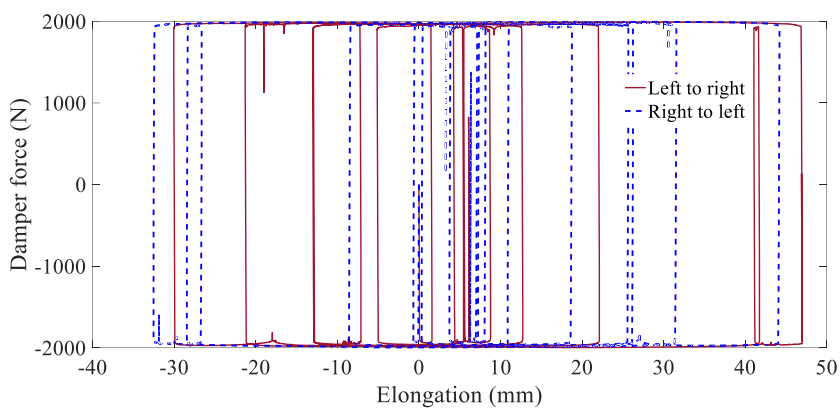


(ب)



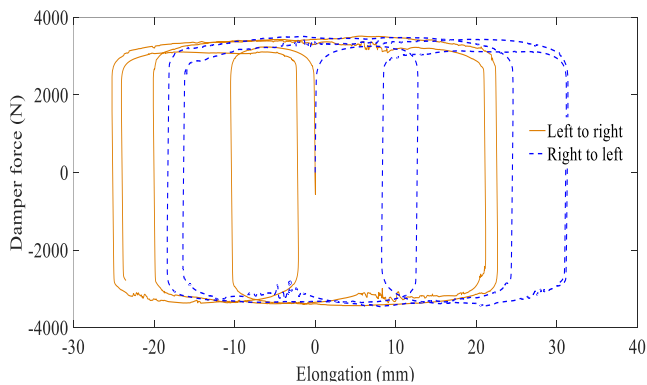
(الف)



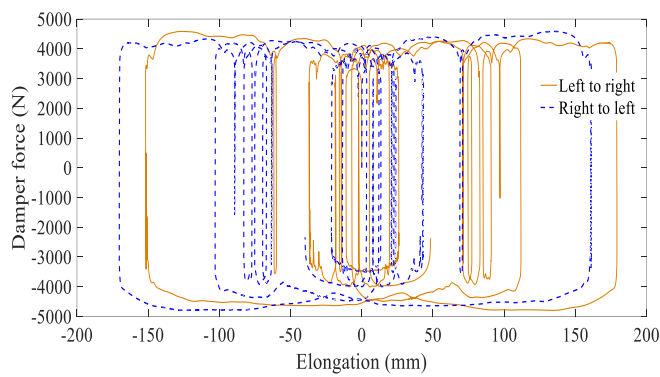


(ج)

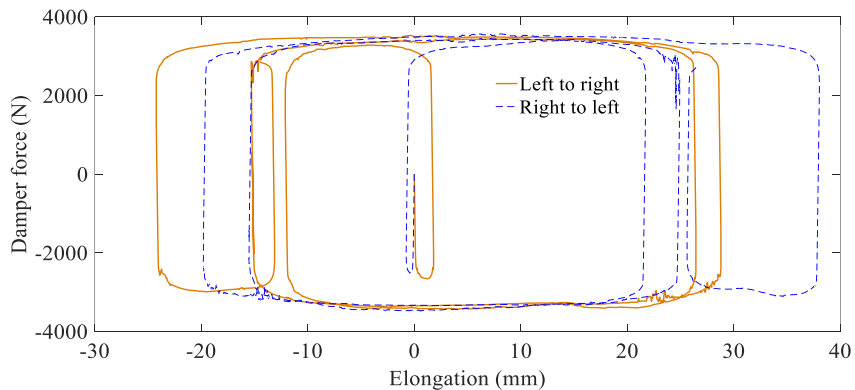
السنترو



(ب)



(الف)



(ج)

گزلی

شکل ۱۳: نمودار تغییرات نیروی میرایی طبقات مختلف در مقابل جابجایی میراگر برای میراگر غیرخطی ویسکوز قرار گرفته در سازه‌ی با رفتار غیرخطی (الف) طبقه‌ی اول (ب) طبقه‌ی دوم (ج) طبقه‌ی سوم.

جدول ۹: مقادیر جذب انرژی در میراگرهای ویسکوز غیرخطی

مقدار جذب انرژی			
(kJ)			
Earthquake	شماره طبقه	Left to right	Right to left
Elcentro	اول	۳/۴۷۷۲	۳/۴۹۵۹
	دوم	۰/۶۲۱۵	۰/۶۵۰۸
	سوم	۰/۶۵۴۳	۰/۷۰۵۶
Gazli	اول	۴/۸۴۸۸	۴/۸۴۶۱
	دوم	۰/۷۰۸۵	۰/۷۱۸۲
	سوم	۰/۶۶۸۵	۰/۷۰۵۸

بر اساس جدول (۹) مشخص است که تحت هر دو زلزله، بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به میراگرهای قرار گرفته در طبقه‌ی اول بوده است و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که قرارگیری میراگر غیرخطی ویسکوز در طبقه‌ی اول در حالت غیرخطی منجر به جذب انرژی بیشتری خواهد شد. همچنین با توجه به جدول (۵) مشخص است که در سازه‌ی کنترل شده با استفاده از میراگر غیرخطی ویسکوز، بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به میراگرهای قرار گرفته در طبقه‌ی سوم می‌باشد و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در تحلیل خطی، قرارگیری میراگر غیرخطی ویسکوز در بالاترین طبقه منجر به جذب انرژی بیشتری خواهد شد. لازم به ذکر است که با توجه به جداول (۵) و (۹)، در تحلیل خطی، نسبت بیشترین جذب انرژی به کمترین جذب انرژی برای سازه‌ی مورد مطالعه تحت زلزله‌ی السنتر و ۱/۵۳ و تحت زلزله‌ی گزلی ۲/۷۱ می‌باشد. از طرف دیگر در تحلیل غیرخطی، بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به میراگرهای قرار گرفته در طبقه‌ی اول می‌باشد که این مقادیر در مقایسه با انرژی‌های جذب شده با رفتار خطی سازه بسیار ناچیز می‌باشند. در تحلیل غیرخطی نیز نسبت بیشترین جذب انرژی به کمترین جذب انرژی برای سازه‌ی تحت زلزله‌ی السنتر و ۵/۵۹ و برای سازه‌ی تحت زلزله‌ی گزلی ۷/۲ می‌باشد. بنابراین مقایسه‌ی مابین نتایج نشان می‌دهد که در رفتار غیرخطی اختلاف زیادی مابین مقادیر جذب انرژی در میراگرها وجود دارد و این نشان می‌دهد که در رفتار غیرخطی صرفاً میراگرهای قرار گرفته در طبقه‌ی اول جذب انرژی داشته‌اند در حالی که در رفتار خطی چون مقدار این اختلاف کمتر می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که تمامی میراگرها با نسبت‌های مختلف در جذب انرژی مشارکت داشته‌اند. این نکته در جدول (۱۰) که میزان درصد مشارکت میراگرها در جذب انرژی را نشان می‌دهد، بررسی شده است.

جدول ۱۰: مقادیر مشارکت میراگرها در جذب انرژی با توجه به موقعیتشان

مشارکت در جذب انرژی				
نوع تحلیل	Earthquake	شماره طبقه	Left to right	Right to left
خطی	Elcentro	اول	٪۳۲/۹۴	٪۳۲/۹۶
		دوم	٪۲۶/۵۱	٪۲۶/۴۹
		سوم	٪۴۰/۵۵	٪۴۰/۵۵
	Gazli	اول	٪۳۵/۵۴	٪۳۵/۳۴
		دوم	٪۱۷/۳۶	٪۱۷/۶۲
		سوم	٪۴۷/۱۰	٪۴۷/۰۴
غیرخطی	Elcentro	اول	٪۷۳/۱۶	٪۷۲/۰۵
		دوم	٪۱۳/۰۸	٪۱۳/۴۱
		سوم	٪۱۳/۷۶	٪۱۴/۵۴
	Gazli	اول	٪۷۷/۸۸	٪۷۷/۲۹
		دوم	٪۱۱/۳۸	٪۱۱/۴۵
		سوم	٪۱۰/۷۴	٪۱۱/۲۶

همچنین با توجه به جدول (۱۰) مشخص است که مقدار جذب انرژی برای میراگرهای قرارگرفته در یک طبقه‌ی برای هر دو حالت تحلیل خطی و غیرخطی تقریباً یکسان می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در نظر گرفتن خصوصیات یکسان برای میراگرهای قرارگرفته در یک طبقه امری منطقی می‌باشد.

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، بررسی کارایی میراگر غیرخطی ویسکوز جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه در حین زلزله با در نظر گرفتن رفتار خطی و غیرخطی برای سازه بررسی شد. فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم گرگ‌های خاکستری و مدل‌سازی سازه‌ی مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار اپنسیس انجام شد. قاب بتنی مورد مطالعه یک دهانه سه طبقه می‌باشد و میراگرهای غیرخطی ویسکوز به صورت ضربدری در تمامی طبقات سازه قرار داده شده‌اند. بهینه‌سازی شامل یافتن مقادیر بهینه برای ضریب میرایی، سختی محوری و توان سرعت میراگر غیرخطی ویسکوز می‌باشد به گونه‌ای که بیشینه قدر مطلق جابجایی بام سازه و بیشینه قدر مطلق برش پایه تحت زلزله‌ها و قیود در نظر گرفته شده کمینه شوند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که:

۱- استفاده از میراگر غیرخطی ویسکوز جهت کنترل بیشینه پاسخ سازه در ناحیه‌ی خطی بسیار مناسب می‌باشد به گونه‌ای که استفاده از این میراگر سبب کاهش بیشینه جابجایی بام و بیشینه برش پایه به میزان  $37/51$  و  $43/39$  درصد تحت زلزله‌ی السنترو و همچنین به میزان  $1/39$  و  $17/74$  درصد تحت زلزله‌ی گزلی شده است. این امر نشان‌دهنده‌ی کارآیی این سیستم در پاسخ سازه‌های با رفتار خطی است اگرچه میزان کاهش بیشینه جابجایی سازه تحت زلزله‌ی گزلی توسط میراگر غیرخطی ویسکوز بسیار ناچیز است، اما با این وجود، این میراگر توانسته است میزان برش پایه‌ی سازه را به میزان  $17/74$  درصد کاهش دهد که خود نشان از توانایی این سیستم در رابطه با کنترل ارتعاشات خطی سازه‌ها می‌باشد.

۲- نظر به این که بیشینه پاسخ‌های سازه در ناحیه‌ی غیرخطی به میزان بسیار جزئی (تقریباً زیر یک درصد) کاهش یافت، استفاده از میراگر غیرخطی ویسکوز جهت کنترل بیشینه پاسخ سازه در ناحیه‌ی غیرخطی چندان مناسب نمی‌باشد و تحت زلزله‌های در نظر گرفته شده (السنترو و گزلی)، کارآیی مناسبی را در کاهش پاسخ سازه از خود نشان نمی‌دهد.

۳- نتایج مطالعات نشان می‌دهند که با تغییر رفتار سازه از خطی به غیرخطی، میراگر غیرخطی ویسکوز با کاهش شدید مقدار توان سرعت ( $\alpha$ ) و تغییر رفتار میراگر به سمت رفتار میراگر اصطکاکی، سعی در کنترل پاسخ سازه دارد که در مقایسه با عملکرد میراگر در بهبود رفتار خطی سازه، چندان کارآمد نمی‌باشد. در حقیقت با کاهش مقدار توان سرعت ( $\alpha$ ) از مقدار بیشتر از  $0/75$  به مقدار کمتر از  $0/12$  و تغییر نوع عملکرد میراگر، کارآیی مناسبی از میراگر در تحلیل غیرخطی دیده نمی‌شود.

۴- نتایج نشان می‌دهند که در سازه‌ی کنترل شده با استفاده از میراگر غیرخطی ویسکوز، بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به میراگرهای قرار گرفته در طبقه‌ی سوم می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در تحلیل خطی، قرارگیری میراگر غیرخطی ویسکوز در طبقات بالاتر منجر به جذب انرژی بیشتری خواهد شد. لازم به ذکر است که در تحلیل خطی، نسبت بیشترین جذب انرژی به کمترین جذب انرژی برای سازه‌ی مورد مطالعه تحت زلزله‌ی السنترو  $1/53$  و تحت زلزله‌ی گزلی  $2/71$  می‌باشد. از طرف دیگر در تحلیل غیرخطی، بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به میراگرهای قرار گرفته در طبقه‌ی اول می‌باشد که این مقادیر در مقایسه با انرژی‌های جذب شده با رفتار خطی سازه بسیار ناچیز می‌باشند. در تحلیل غیرخطی نسبت بیشترین جذب انرژی به کمترین جذب انرژی برای سازه‌ی تحت زلزله‌ی السنترو  $5/59$  و برای سازه تحت زلزله‌ی گزلی  $7/2$  می‌باشد. بنابراین مقایسه‌ی مابین نتایج نشان می‌دهد که در رفتار غیرخطی اختلاف بسیار زیادی مابین مقادیر جذب انرژی در میراگرها وجود دارد و این نشان می‌دهد که در رفتار غیرخطی صرفاً میراگرهای قرار گرفته در طبقه‌ی اول جذب انرژی داشته‌اند در حالی که در رفتار خطی چون مقدار این اختلاف کمتر می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که تمامی میراگرهای در جذب انرژی با نسبت‌های مختلفی مشارکت داشته‌اند.

۵- در تحلیل خطی، نه تنها بیشینه پاسخ (جابجایی بام و برش پایه) سازه‌ی کنترل شده با استفاده از میراگر غیرخطی ویسکوز کاهش یافته است بلکه در تمام مدت زمان تحلیل، پاسخ‌های سازه‌ی کنترل شده با استفاده از میراگر خطی ویسکوز نیز کاهش یافته‌اند و این نیز دلیل دیگری برای نشان دادن کارآیی این سیستم کنترلی در کنترل پاسخ سازه‌ی با رفتار خطی است.

۶- میزان جذب انرژی توسط میراگر غیرخطی ویسکوز در رفتار غیرخطی نسبت به رفتار خطی بسیار ناچیز بوده است و عملاً استفاده از این میراگر به تنهایی جهت کنترل سازه‌ی با رفتار غیرخطی مناسب نمی‌باشد.

۷- با توجه به میزان جذب انرژی یکسان برای میراگرهای قرار گرفته در یک طبقه‌ی در هر دو حالت تحلیل خطی و غیرخطی، می‌توان نتیجه گرفت که در نظر گرفتن خصوصیات یکسان برای میراگرهای قرار گرفته در یک طبقه امری منطقی است.

## سپاسگزاری

مؤلفین بر خود لازم می‌دانند تا از مرکز محاسبات دانشگاه شهرکرد بابت در اختیار گذاشتن کامپیوترهای پردازش سریع که انجام این پژوهش بدون وجود آنان ممکن نبود، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

## مراجع

- [1] Lee, D. and Taylor, D P. (2001). Viscous damper development and future trends. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 10(5), 311-320.
- [2] Høgsberg, J. and Brodersen, M L. (2016). Hybrid viscous damper with filtered integral force feedback control. *Journal of Vibration and Control*, 22(6), 1645-1656.
- [3] Silwal, B. and Michael, R J. and Ozbulut, O E. (2015). A superelastic viscous damper for enhanced seismic performance of steel moment frames. *Engineering Structures*, 105, 152-164.
- [4] Tubaldi, E. and Ragni, L. and Dall'Asta, A. (2015). Probabilistic seismic response assessment of linear systems equipped with nonlinear viscous dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 44(1), 101-120.
- [5] Naghipour, M. and Salim Bahrami, S R. (2017). Improving the seismic performance of eccentrically braced frames by using a ductile element. *Journal of Structural and Constructional Engineering*, 4(3), 18-27.
- [6] Mahmoudi Sahebi, M. and Khanjani, F. (2017). Evaluation of seismic performance of X bracing systems equipped with flexural yielding dampers. *Journal of Structural and Constructional Engineering*, 4(2), 123-138.
- [7] Yu, Y-J. and Tsai, K-C. and Li, C-H. and Weng, Y-T. and Tsai, C-Y. (2013). Earthquake response analyses of a full-scale five-story steel frame equipped with two types of dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 42(9), 1301-1320.
- [8] Akcelyan, S. and Lignos, D G. and Hikino, T. (2018). Adaptive numerical method algorithms for nonlinear viscous and bilinear oil damper models subjected to dynamic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113, 488-502.
- [9] Kamgar, R. and Hatefi, S M. and Majidi, N. (2018). A Fuzzy Inference System in Constructional Engineering Projects to Evaluate the Design Codes for RC Buildings. *Civil Engineering Journal*, 4(9), 2155-2172.
- [10] Kamgar, R. and Khatibinia, M. and Khatibinia, M. (2019). Optimization criteria for design of tuned mass dampers including soil-structure interaction effect. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 9(2), 213-232.
- [11] Kaveh, A. and Ilchi Ghazaan, M. (2015). A comparative study of CBO and ECBO for optimal design of skeletal structures. *Computers and Structures*, 153, 137-147.
- [12] Kaveh, A. and Bakhshpoori, T. and Azimi, M. (2015). Seismic optimal design of 3D steel frames using cuckoo search algorithm. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24(3), 210-227.
- [13] Kamgar, R. and Khatibinia, M. (2017). Multi-objective optimization design of tuned mass damper system subjected to critical excitation. *Modares Civil Engineering Journal*, 17(4), 153-164.
- [14] Kamgar, R. and Samea, P. and Khatibinia, M. (2018). Optimizing parameters of tuned mass damper subjected to critical earthquake. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(7), e1460.
- [15] Khatibinia, M. and Gholami, H. and Kamgar, R. (2018). Optimal design of tuned mass dampers subjected to continuous stationary critical excitation. *International Journal of Dynamics and Control*, 6(3), 1094-1104.
- [16] Najafzadeh, M. and Tafarjnoruz, A. (2016). Evaluation of neuro-fuzzy GMDH-based particle swarm optimization to predict longitudinal dispersion coefficient in rivers. *Environmental Earth Sciences*, 75(2), 157.

- [17] Khaledy, N. and Habibi, A R. and Memarzadeh, P. (2019). Minimum weight and drift design of steel moment frames subjected to blast. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 9(1), 39-63.
- [18] Khatibinia, M. and Yazdani, H. (2018). Accelerated multi-gravitational search algorithm for size optimization of truss structures. *Swarm and Evolutionary Computation*, 38, 109-119.
- [19] Gholizadeh, S. and Poorhoseini, H. (2016). Seismic layout optimization of steel braced frames by an improved dolphin echolocation algorithm. *Structural Multidisciplinary Optimization*, 54(4), 1011-1029.
- [20] Mazzoni, S. and McKenna, F. and Scott, M H. and Fenves, G L. (2006). OpenSees command language manual. *Pacific Earthquake Engineering Research Center*.
- [21] Soong, T T. and Dargush, G F. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. Wiley
- [22] Symans, M. and Constantinou, M. (1998). Passive fluid viscous damping systems for seismic energy dissipation. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 35(4), 185-206.
- [23] Mirjalili, S. (2015). How effective is the Grey Wolf optimizer in training multi-layer perceptrons. *Applied Intelligence*, 43(1), 150-161.
- [24] Mirjalili, S. and Mirjalili, S M. and Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61.
- [25] Mirjalili, S. and Saremi, S. and Mirjalili, S M. and Coelho, L d S. (2016). Multi-objective grey wolf optimizer: A novel algorithm for multi-criterion optimization. *Expert Systems with Applications*, 47, 106-119.
- [26] Chopra, A K. (2017). *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. Prentice-hall International Series.
- [27] Choi, I-R. and Park, H-G. (2011). Cyclic Loading Test for Reinforced Concrete Frame with Thin Steel Infill Plate. *Journal of Structural Engineering*, 137(6), 654-664.
- [28] Benavent-Climent, A. and Oliver-Saiz, E. and Donaire-Avila, J. (2015). New connection between reinforced concrete building frames and concentric braces: Shaking table tests. *Engineering Structures*, 96, 7-21.
- [29] Dynamic analyses of 1-story moment frame with viscous dampers, (2018). *Dynamic analyses of 1-story moment frame with viscous dampers*. Available at: [http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Dynamic\\_Analyses\\_of\\_1-Story\\_Moment\\_Frame\\_with\\_Viscous\\_Dampers](http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Dynamic_Analyses_of_1-Story_Moment_Frame_with_Viscous_Dampers)
- [30] Pall, A S. and Marsh, C. (1982). Response of friction damped braced frames. *Journal of Structural Engineering*, 108(9), 1313-1323.