



Optimal Design and Performance Assessment of Viscous Dampers in Steel Frames Based on Life Cycle Cost

H. N. Ahadzadeh kolour, M. Charkhtab Basim* , M.R. Chenaghlu

Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

ABSTRACT: In recent years, it is tried to express the expected performance of structures as financial and social measures. In this study, an algorithm for the optimal design of viscous dampers with the goal of achieving minimum total cost is presented. For this purpose, an appropriate cost model to determine the initial cost of equipping structures with viscous dampers has been presented and the expected costs of the structure due to possible earthquakes over its life cycle have been estimated using life cycle cost analysis (LCCA). The results of this analysis have been used in an optimization algorithm with the aim of achieving the minimum total cost of structures. To evaluate the seismic behavior of structures, the Endurance Time (ET) method is used as a dynamic analysis method which requires much less computation effort than conventional time history methods. In this regard, three-moment frames with 3,7 and 15 stories having weakness in initial design are modeled nonlinearly, and then, using a genetic algorithm, the optimum arrangement of linear and nonlinear viscous dampers along with the damping exponent (α) is acquired. Two closed-form methods have also been used for the design of viscous dampers, namely energy-based damping design and displacement-based design. Finally, the performance of the structures has been evaluated and compared under 12 far-field and 12 near-fault ground motion records.

Review History:

Received: Nov. 16, 2019

Revised: Jan. 26, 2020

Accepted: Feb. 04, 2020

Available Online: Mar. 01, 2020

Keywords:

Endurance Time Method

Life Cycle Cost Analysis

Structural Optimization

Fluid Viscous Damper

Genetic Algorithm

1- Introduction

Many research works have been done on the performance assessment of structures equipped with viscous dampers [1, 2]. Life cycle cost analysis (LCCA) has been introduced in the construction industry to take into account the economic considerations in decision-making [3]. By using this analysis, one can estimate the expected costs of possible earthquakes over the life cycle of structures. In the area, Bahmani and Zahrai [4] proposed a new method to characterize the nonlinear viscous dampers. They determined the optimum retrofitting level (ORL) and used the inter-story drift ratio as the effective parameter to calculate the failure cost of structures. In 2016, Basim et al. [5] presented a novel design approach based on the total value of the structure using the benefits of the Endurance Time (ET) method. Their proposed method for calculating the life cycle cost using the ET method can greatly reduce the amount of required computation effort and allow the use of cost as an objective function in the optimization process which is addressed in the current study.

By using the aforementioned method in this study, it is attempted to propose a suitable solution for the optimized design of viscous dampers based on the life cycle cost. Thus, steel structures equipped with linear viscous dampers are

designed to have the lowest total cost over their lifetime. Also, in structures equipped with nonlinear viscous dampers, in addition to the damping values, the optimal damping exponent (α) is also determined based on the minimum total cost of the structures. To estimate the initial cost, an appropriate cost model is presented here and on the other hand, expected costs due to possible earthquakes are estimated based on a common framework in the technical literature. The total cost of the structure (the sum of the initial cost and the lifetime cost) as an objective function is used in an optimization algorithm. The results of the proposed framework are compared with the results of two closed-form methods, namely, energy-based damping design (UD and SPD) and displacement-based design (DBD). In addition, the performance of the structures has been evaluated and compared under 12 far-field and 12 near-fault ground motion records.

2- Cost analysis

2- 1- Life cycle cost

Calculating the Life Cycle Cost (C_{LC}) requires determining the number of damages that occur during an earthquake in a structure. Damage may be expressed using different Damage Indices (DI). An example is a relationship

*Corresponding author's email: basim@sut.ac.ir



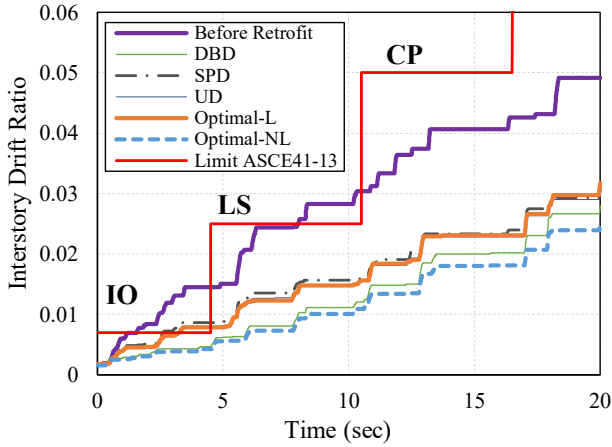


Fig. 1. Comparison of ET Curve for 7-storey structure with different damper designs with allowable limits of ASCE41-13.

between the inter-story drift ratio and the limit states used in ATC-13 [6]. The life cycle cost (C_{LC}) is calculated as the sum of the calculated cost according to the various damage indices (Eq. 1).

$$C_{LC}(t,s) = \sum_{i=1}^{DI} C_{LC}^i(t,s) \quad (1)$$

Each cost component due to a damage index is a function of the sum of the limit state costs of the system according to Eq. 2.

$$C_{LC}^{DI}(t,s) = \sum_{i=1}^n f(C_{LS}^i,t,s) \quad (2)$$

In this equation, n is the number of limit states considered for each damage index. includes damage repair cost, loss of contents cost due to inter-story drift, loss of contents cost due to floor acceleration, loss of rental cost, cost of income loss, cost of injuries, cost of human fatalities. The quantification of these damages as economic parameters depends on many local and social considerations and is addressed in work by Wen & Kang [7]. According to the method proposed by Basim et al. [5], the expected costs due to future earthquakes can be calculated using the ET method to acquire the structural responses at various hazard levels and the mean cost parameters from [6] and [8].

2- 2- Initial Cost

The initial cost of \$600 per square meter is assumed for the entire area of the bare building. This study requires the estimation of the initial cost of the dampers in the process of cost analysis and since no appropriate cost model has been

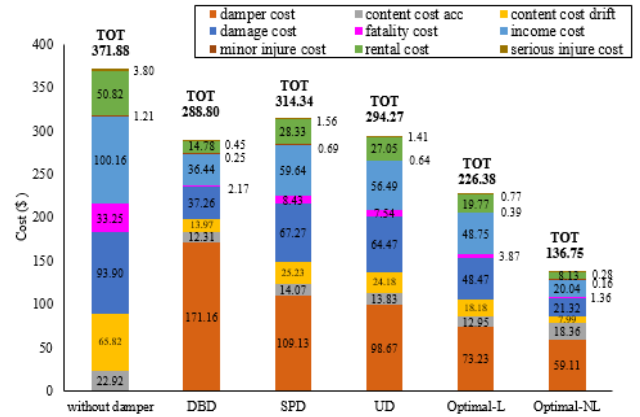


Fig. 2. Comparison of cost components for different damper designs and without damper for one square meter in the 7 story structure.

reported for the initial cost of FVDs, a simple cost model is proposed in this study based on a survey on Maurer’s products (MHD). This model is used here to estimate the initial cost of dampers in terms of the damping force and stroke of dampers (Eq. 3).

$$MHD \text{ Price} = 6295.552 \times \exp(0.5 \times (((\log(F) \times 1000 - 14.732) / -0.545)^2 + (1.06E + 47) \times \exp(-0.5 \times (((\log(stroke) - 464.046) / -32.452)^2))) \quad (3)$$

where F and stroke represent the force induced in the damper at a velocity of 1 m/s and the allowable displacement of the two ends of the damper, respectively.

3- Results and Discussion

In this study, three steel moment frames with 3, 7 and 15 stories and weaknesses in their initial design have been investigated. OpenSees software was used to conduct time history analyzes. The viscous dampers are optimally designed for structures to have the minimum total cost. In the first step, the linear viscous dampers are optimally designed and in the next step, the damping exponent (α) is added to the optimized parameters, and the damping coefficients and damping exponent (α) are optimally designed for the nonlinear dampers.

Figure 1 shows the ET Curve for the 7 story structure with various designs of viscous dampers to compare their seismic performance at different hazard levels according to ASCE41-13 [9]. The nonlinear optimum dampers have the best performance among others.

Figure 2 shows the cost components per square meter for the 7 story structure with different designs of dampers. The structure equipped with optimal nonlinear viscous dampers with an optimum alpha value of 0.3 has the lowest total cost compared to others. It should be noted that only the

loss of contents cost due to floor acceleration in nonlinear design is more than the linear one. The justification is that in nonlinear viscous dampers at velocities less than 1 m/s, the force induced in the damper is higher than the linear dampers. As a result, the acceleration generated by nonlinear dampers at lower excitation intensities will be greater than those for linear dampers and this will increase the expected costs of loss of contents due to floor accelerations.

4- Conclusions

- A cost-optimal design algorithm for structures with passive control systems was presented. The endurance time method is used to estimate the seismic response of structures at different intensity levels.
- It was shown that the ET method provides a proper tool for estimation of expected costs while the amount of computational effort is kept at an acceptable level to be used in the optimization process.
- Using the life cycle cost analysis of structures equipped with nonlinear viscous dampers, the optimum damping exponent (α) is obtained 0.3. Therefore, the use of this value in the design and production of viscous dampers is suggested. It has also been shown that nonlinear dampers have a better performance in reducing the maximum inter-story drift ratio than linear dampers.
- Comparison of expected costs in structures equipped with viscous dampers for the three structures showed that the use of these dampers reduces the life cycle cost of structures and the reduction is large enough to justify the added initial cost of dampers.

References

- [1] Estekanchi, H.E. and Basim, M.C., 2011. "Optimal damper placement in steel frames by the Endurance Time method". *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(5), pp. 612-630.
- [2] Altieri, D., Tubaldi, E., Patelli, E. and Dall'Asta, A., 2017. "Assessment of optimal design methods of viscous dampers". *X International Conference on Structural Dynamics, EUROLYN*, 199, pp. 1152-1157.
- [3] Sánchez-Silva, M. and Rackwitz, R., 2004. "Socioeconomic implications of life quality index in design of optimum structures to withstand earthquakes". *Journal of Structural Engineering*, 130(6), pp. 969-977.
- [4] Bahmani, M. and Zahrai, S.M., 2019. "Application of a comprehensive seismic retrofit procedure for steel buildings using nonlinear viscous dampers". *International Journal of Civil Engineering*, 17(8), pp. 1261-1279.
- [5] Basim, M.C., Estekanchi, H.E. and Vafai, A., 2016. "A methodology for value based seismic design of structures by the endurance time method". *Scientia Iranica*, 23(6), pp. 2514-2527.
- [6] ATC-13, Applied technology council, 1985. Earthquake damage evaluation data for California.
- [7] Wen, Y. and Kang, Y., 2001. "Minimum building life-cycle cost design criteria. II: Applications". *Journal of Structural Engineering*, 127(3), pp. 338-346.
- [8] FEMA-227, Federal Emergency Management Agency Building Seismic Safety Council, 1992. A Benefit-Cost Model for the Seismic Rehabilitation of Building, WashingtonDC.
- [9] ASCE/SEI 41, American Society of Civil Engineers, 2013. Seismic evaluation and retrofit of existing buildings. Virginia.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

N. Ahadzadeh kolour, M. Charkhtab Basim, M.R. Chenaghloou, *Optimal Design and Performance Assessment of Viscous Dampers in Steel Frames Based on Life Cycle Cost*, Amirkabir J. Civil Eng., 53(6) (2021) 531-534.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17403.6551





طرح بهینه و بررسی عملکرد میراگرهای ویسکوز در سازه‌های فولادی بر اساس هزینه دوره عمر

سیده نرجس احدزاده کلور، محمد چرختاب بسیم*، محمدرضا چناقلو

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۸/۲۵

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۰۶

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۵

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۲/۱۱

کلمات کلیدی:

روش زمان دوام

تحلیل هزینه ی دوره ی عمر

بهینه سازی

میراگرهای ویسکوز

الگوریتم ژنتیک

خلاصه: در سال های اخیر سعی شده است عملکرد مورد انتظار سازه ها تحت خطرات لرزه ای به صورت معیارهای اقتصادی و اجتماعی بیان شوند. بر این اساس، در این پژوهش الگوریتمی برای طراحی بهینه میراگرهای ویسکوز با هدف رسیدن به حداقل هزینه کل ارائه شده است. برای این منظور یک مدل هزینه مناسب جهت تعیین هزینه اولیه مجهز کردن سازه به میراگرهای ویسکوز ارائه شده و هزینه های مورد انتظار در اثر زلزله های محتمل در دوره ی عمر سازه با استفاده از تحلیل هزینه دوره ی عمر (LCCA) تخمین زده شده است. نتایج این تحلیل در یک الگوریتم بهینه سازی با هدف دستیابی به سازه ای با هزینه ی کل حداقل مورد استفاده قرار گرفته است. برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها از روش زمان دوام به عنوان یک روش تحلیل دینامیکی که نیازمند حجم محاسبات بسیار کمتری در مقایسه با روش های معمول تاریخچه زمانی می‌باشد، استفاده شده است. سه قاب خمشی ۱۵ و ۷ و ۳ طبقه ی منظم دارای ضعف در طراحی اولیه به صورت غیرخطی مدل شده و با به کارگیری الگوریتم ژنتیک، چینه میراگرهای ویسکوز خطی و میراگرهای ویسکوز غیرخطی به همراه توان سرعت (آلفا) در ارتفاع ساختمان به گونه ای تعیین شده است که سازه ی به دست آمده کمترین هزینه ی کل را در دوره عمر خود داشته باشد. همچنین از دو روش فرم بسته به نام های طراحی میراگر بر مبنای انرژی و طراحی بر اساس جابجایی مستقیم نیز برای طراحی میراگرها استفاده شده است. در انتها عملکرد سازه های مجهز به میراگرهای طراحی شده بر اساس روش های مختلف تحت دوازده رکورد زلزله حوزه دور و حوزه نزدیک بدون پالس مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۱- مقدمه

مجهز به میراگر ویسکوز انجام شده است. برای مثال در سال ۲۰۱۱ بسیم و استکانچی [۱] از روش زمان دوام برای یافتن چینه بهینه میراگرهای ویسکوز در قابهای فولادی بهره جستند. آن‌ها با به کارگیری الگوریتم ژنتیک چینه میراگرها را در ارتفاع ساختمان به گونه ای تعیین کردند که سازه بتواند به عملکرد مجاز آیین نامه دست پیدا کند. در مقایسه ای که بین عملکرد سازه های مجهز به میراگر و بدون آن انجام دادند مشاهده کردند که در سطوح مختلف عملکردی، حداکثر جابجایی بین طبقات در سازه مجهز به میراگر در مقایسه با سازه بدون میراگر کاهش چشمگیری داشته است. سئو و کاراواسیلیس [۲] در سال ۲۰۱۴ مطالعاتی بر روی قاب های خمشی مجهز به میراگرهای سیال ویسکوز انجام دادند تا به گونه ای طراحی شوند که از قابهای خمشی ویژه مقاومت کمتری داشته اما به

هدف اصلی طراحی لرزه ای یک سازه، اطمینان از عدم ایجاد خرابی هایی است که آن سازه نباید آن‌ها را در طول عمر خود تجربه کند. با توجه به اثرات زلزله های اخیر می توان گفت که ریسک مخاطرات لرزه ای در مناطق شهری به مراتب بالاتر از سطوح قابل قبول اقتصادی و اجتماعی می باشد. برای رسیدن به عملکرد مورد انتظار در سازه‌ها، ابزارها و شیوه های مختلفی پیشنهاد شده است که سیستم‌های جاذب انرژی و میراگرها نمونه‌هایی از آن است. این سیستم ها به منظور بهبود عملکرد سازه و همچنین کاهش خرابی سازه در زلزله به کار برده می شوند. روش های طراحی به خصوص روش های طراحی بهینه ی این سیستم‌ها همواره مورد توجه محققین و مهندسين سازه بوده است. تحقیقات بسیاری در زمینه عملکرد سازه های



را انجام دادند. روش ترکیبی ارائه شده توسط آن‌ها امکان دستیابی به سطح هدف مورد نظر از عملکرد میراگرها را فراهم می‌کند. ویتل و همکاران^۷ [۸] در سال ۲۰۱۲ پنج روش طراحی چینش میراگر ویسکوز در سازه را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند که دو روش آن به صورت استاندارد و سه روش به صورت پیشرفته برای بهبود سطوح عملکرد لرزه‌ای از جمله جابجایی حداکثر بین طبقات، شتاب مطلق و دررفت پسماند بود. آن‌ها نتیجه گرفتند در تمام روش‌های قرارگیری میراگر ویسکوز، عملکرد سازه از لحاظ جابجایی بین طبقه‌های در حد مطلوب قرار می‌گیرد، اما روش‌های پیشرفته در کاهش و توزیع دررفت عملکرد بهتری داشتند و تفاوت عملکرد سازه در بین روش‌های پیشرفته جزئی است. هونگ و همکاران^۸ [۹] در سال ۲۰۱۳ دو روش توزیع غیر تکراری را به وسیله چند روش معمول طراحی میراگر ویسکوز و یک الگوریتم جستجوی پی در پی تکراری ساده شده مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مطالعات عددی خود را بر روی سه قاب خمشی دو بعدی منظم و نامنظم انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگر نسبت میرایی اضافه شده یکسان باشد، در همه روش‌های توزیع میرایی پاسخ‌های لرزه‌ای می‌تواند به صورت مشابه باشد. مطالعاتی نیز در خصوص هزینه دوره عمر سازه‌ای مجهز به میراگرهای ویسکوز انجام شده است. بهمنی و زهرایی [۱۰] در سال ۲۰۱۹ از یک روش جدید برای تعیین خصوصیات میراگرهای ویسکوز غیرخطی (NLVDS) استفاده کردند. آن‌ها همچنین با ارائه یک فرمول جدید و سراسر و بدون محاسبات پیچیده، سطح بهینه مقاوم سازی را تعیین کردند و نسبت جابجایی بین طبقه را به عنوان یک پارامتر مؤثر برای محاسبه هزینه خرابی سازه‌ها و تعیین حالت‌های حدی در نظر گرفتند. بر اساس نتایج عددی حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، مشاهده کردند که این روش طراحی می‌تواند به طور مؤثر در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی مجهز به میراگر ویسکوز غیرخطی مورد استفاده قرار گیرد، در نتیجه اهداف عملکردی سازه را برای هرگونه رکورد زلزله با هر شدتی تأمین می‌کند و همچنین می‌تواند هزینه‌های دوره عمر را به طور مؤثر کاهش دهد.

بسیم و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۶ یک روش طراحی جدید بر اساس ارزش کل سازه با استفاده از مزایای روش زمان دوام ارائه

سطوح عملکرد لرزه‌ای یکسان یا بهتر دست یابند. همچنین آلتیری و همکاران^۱ [۳] در سال ۲۰۱۷ به ارزیابی پاسخ‌های لرزه‌ای میراگر ویسکوز در ساختمان فولادی و اثر ویژگی‌های مختلف زمین لرزه بر روی پاسخ‌ها پرداختند. آن‌ها همچنین ویژگی‌های طراحی بهینه‌ی میراگر ویسکوز را با استفاده از یک روش طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان مورد ارزیابی قرار دادند و این روش را با هدف کنترل عملکرد قاب ساختمانی و محدودسازی هزینه‌ی میراگر ارائه کردند.

در سال‌های اخیر، خسارات مالی و اثرات اجتماعی فراوان ناشی از بلایای طبیعی، نیاز به روش‌های طراحی پیشرفته برای کاهش خسارات و اثرات اقتصادی به سطحی قابل قبول و همچنین کاهش تلفات و صدمات جانی را نشان داده است. برای این منظور که بتوان ملاحظات اقتصادی را در مراحل تصمیم‌گیری اثر داد، تحلیل هزینه دوره عمر^۲ (LCCA) در صنعت ساختمان وارد شده است. با استفاده از این تحلیل می‌توان هزینه‌های مورد انتظار در اثر زلزله‌های محتمل در دوره عمر یک سازه مجهز به میراگر ویسکوز را تخمین زد. سپس در مرحله بعد نتایج این تحلیل می‌تواند در یک الگوریتم بهینه‌سازی به منظور دستیابی به سازه‌ای با هزینه کل مینیمم مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان یکی از کارهای تأثیرگذار در زمینه‌ی هزینه‌های مورد انتظار، ون و کنگ^۳ [۴] در سال ۲۰۰۱ سود و هزینه‌ی دراز مدت یک سیستم مهندسی در معرض خطرات متعدد را فرمول بندی کردند. تاکاهاشی و همکاران^۴ [۵] در سال ۲۰۰۴ هزینه‌های دوره‌ی عمر سازه را با استفاده از یک مدل برای رخداد زلزله در یک منبع لرزه‌های فرمول نویسی کردند و این مدل را برای طراحی یک سازه با کاربری اداری استفاده کردند. دیمیتراکاپولوس و کاپوس^۵ [۶] نیز در سال ۲۰۰۸ تحلیل سود و زیان و هزینه دوره عمر را به عنوان ابزار تصمیم‌گیری برای امکان‌سنجی مقاوم سازی یک سازه بتنی استفاده کردند. سیلوستری و همکاران^۶ [۷] در سال ۲۰۱۰ یک روش عملی برای طراحی لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی مجهز به میراگرهای ویسکوز ارائه کردند. همچنین آن‌ها به عنوان یک راهنمای طراحی ترکیب و مقایسه‌ای از کارهای گذشته در زمینه طراحی میراگرهای ویسکوز

- 1 Altieri & et al.
- 2 Life Cycle Cost Analysis
- 3 Wen & Kang
- 4 Takahashi et al.
- 5 Kappos & Dimitrakopoulos
- 6 Silvestri et al.

7 Whittle et al.

8 Hwang et al.

بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک سعی بر رفع این مشکل شده است. نحوه ی رفتار سازه در مقابل زلزله تعیین کننده ی میزان خسارتی است که در طی آن به سازه وارد می شود. بنابراین تحلیل هزینه ی دوره ی عمر LCCA نیاز به محاسبه ی مؤلفه های هزینه مرتبط با عملکرد سازه در سطوح مختلف شدت لرزه ای دارد. بهترین روش برای درک عملکرد سازه تحت شدت های مختلف زلزله استفاده از مدل های غیرخطی دقیق از سازه و اعمال رکوردهای مختلف زلزله های محتمل با توجه به ساختگاه و در شدت های مختلف می باشد. اما این شیوه مستلزم تحلیل های پرحجم و زمان بر دینامیکی بوده و برای روش های طراحی تقریباً غیرعملی می نماید. در این راستا برای عبور از موانع فوق از روش زمان دوام ET به عنوان یک روش تحلیل دینامیکی که نیازمند حجم محاسبات بسیار کمتری در مقایسه با روش های معمول تاریخچه زمانی می باشد برای تخمین عملکرد لرزه ای سازه در سطوح شدت لرزه ای مختلف استفاده شده است [۱۲]. در این روش عملکرد سازه، در شدت های مختلف توسط یک تحلیل تاریخچه زمانی به دست می آید که جایگزین تحلیل مکرر سازه تحت رکوردهای زلزله مقیاس شده در روش IDA است [۱].

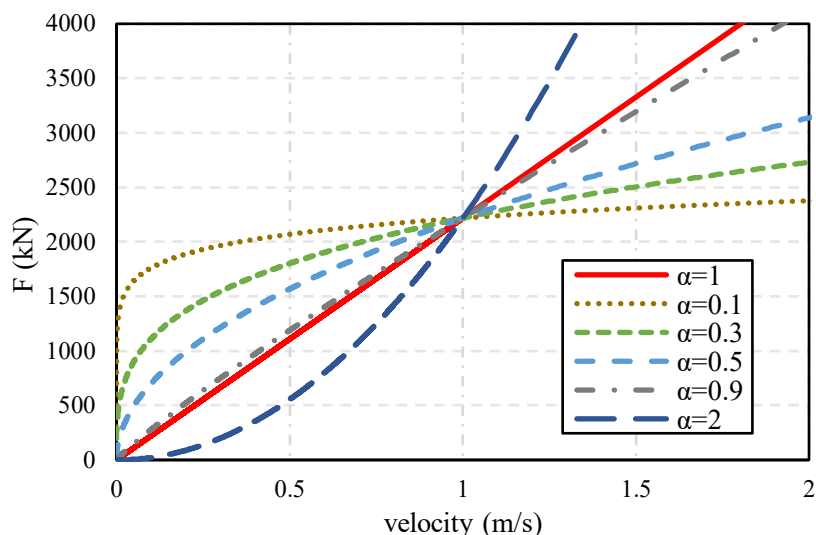
۲- میراگرهای ویسکوز

رابطه نیرو-سرعت برای میراگرهای سیال ویسکوز می تواند به صورت تحلیلی بر اساس رابطه زیر بیان گردد:

$$f_D = C_\alpha \operatorname{sgn}(\dot{u}) |\dot{u}|^\alpha \quad (1)$$

در این رابطه C_α ضریب میرایی تعیین شده به وسیله آزمایش می باشد، α یک توان حقیقی مثبت است که به طور معمول برای کاربردهای لرزه ای در محدوده ۰/۳۵ تا ۱ به کار می رود و $\operatorname{sgn}()$ تابع علامت می باشد. رابطه (۱) برای $\alpha = 1$ به صورت $f_D = C_1 \dot{u}$ در می آید که بیانگر سیال ویسکوز خطی می باشد و برای $\alpha = 0$ به صورت $f_D = C_0 \operatorname{sgn}(\dot{u})$ خواهد بود که نشانگر میراگر کاملاً اصطکاکی می باشد. بنابراین α مشخص کننده غیرخطی بودن میراگرهای سیال ویسکوز است [۱۳]. میراگرهای ویسکوز خطی در کاهش نیازهای لرزه ای سازه ها موثر می باشند، ولی ممکن است در کاربردهایی که سرعت های سازه ای بزرگی رخ می دهد (همانند

کردند. در این روش مفهوم ارزش مستقیماً در روند طراحی وارد شده و سعی شده است سازه ی به دست آمده کمترین هزینه ی کل را در دوره ی عمر خود داشته باشد. آن ها توانستند یک چهارچوب قطعی برای تحلیل هزینه ی دوره ی عمر (LCCA) توسط نتایج روش زمان دوام ارائه کنند. روش پیشنهادی آن ها برای محاسبه هزینه دوره عمر با استفاده از روش زمان دوام می تواند حجم محاسبات لازم را تا حد زیادی کاهش داده و لذا استفاده از هزینه به عنوان یک تابع هدف در فرآیند بهینه سازی را میسر سازد. لذا در این پژوهش سعی شده است با استفاده از روش ذکر شده، راهکاری مناسب برای طراحی بهینه ی میراگرهای ویسکوز بر اساس هزینه ی دوره عمر در سازه های فولادی ارائه گردد و بدین ترتیب سازه های مجهز به میراگر ویسکوز خطی به گونهای طراحی گردد که کمترین هزینه کل را در دوره عمر خود داشته باشد. هم چنین در سازه های مجهز به میراگر ویسکوز غیرخطی علاوه بر مقادیر میرایی، مقدار بهینه ی توان میرایی آلفا نیز بر اساس هزینه کل مینیمم سازه تعیین شده است. برای تخمین هزینه اولیه یک مدل هزینه مناسب جهت تعیین هزینه اولیه مجهز کردن سازه به میراگرهای ویسکوز ارائه شده است. هزینه های مورد انتظار در اثر زلزله های محتمل در دوره ی عمر سازه نیز بر اساس یک چهارچوب متداول در ادبیات فنی تخمین زده شده است. در نهایت هزینه کل سازه (مجموع هزینه اولیه و هزینه دوره عمر) به عنوان تابع هدف در یک الگوریتم بهینه سازی وارد شده است. برای نشان دادن روش و بررسی نتایج، سه قاب خمشی ۱۵ و ۷ و ۳ طبقه ی منظم دارای ضعف در طراحی اولیه به صورت غیرخطی مدل شده و با به کارگیری الگوریتم ژنتیک چینه س میراگرهای ویسکوز خطی و میراگرهای ویسکوز غیرخطی به همراه توان سرعت (آلفا) در ارتفاع ساختمان تعیین شده است. نتایج به دست آمده از چهارچوب ارائه شده با نتایج دو روش فرم بسته به نام های طراحی میراگر بر مبنای انرژی و طراحی بر اساس جابجایی مستقیم مقایسه شده است. همچنین عملکرد سازه های مجهز به میراگرهای طراحی شده بر اساس روش های مختلف تحت دوازده رکورد زلزله حوزه دور و حوزه نزدیک بدون پالس مورد ارزیابی قرار گرفته است. از آنجایی که بحث های مربوط به بهینه سازی نیازمند تحلیل های زمان بر و حجیمی هستند، در این پژوهش با استفاده از روش های تحلیلی زمان دوام و همچنین محدود کردن متغیرهای طراحی میراگر ویسکوز در فرآیند



شکل ۱. رابطه نیرو-سرعت در میراگر ویسکوز به ازای $F=2218\text{kN}$ و آلفاهای مختلف

Fig. 1. Force-velocity relation in viscous damper for $F=2218\text{kN}$ and different α values

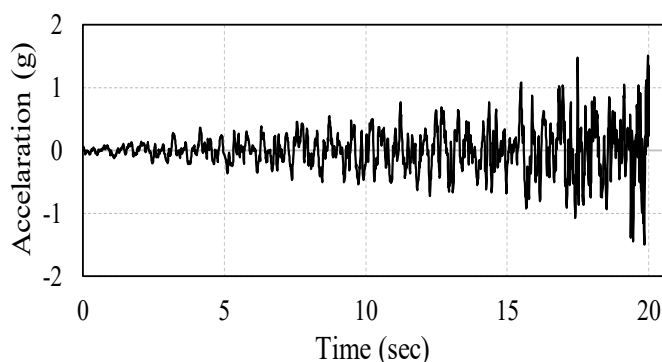
۱ افزایش می‌یابد. مقادیر توان سرعت (آلفا) برای میراگرهای ویسکوز بر اساس نوع میراگر و شرکت سازنده آن متفاوت می‌باشد. برای مثال بر اساس مرجع [۷]، مقدار آلفا برای محصولات شرکت Taylor Devices در محدوده ۰/۱۵ تا ۱ قرار دارد که برای میراگرهای ویسکوز در برابر نیروی زلزله در محدوده ۰/۲ تا ۰/۵ و برای نیروی باد در محدوده ۰/۵ تا ۱ در نظر گرفته می‌شود. مقدار توان سرعت (آلفا) برای محصولات شرکت Maurer که در این پژوهش نیز مورد استناد قرار گرفته است در محدوده ۰/۰۴ تا ۱ قرار دارد. یکی از اهداف این مقاله تعیین توان بهینه آلفا می‌باشد. برای بررسی تأثیر میراگرها بر روی عملکرد کلی سازه، لازم است پاسخ سازه در شدت‌های مختلف به صورت همزمان مورد بررسی قرار گیرد. چنین مطالعه‌ای می‌تواند در چهارچوب بررسی هزینه دوره عمر به نحو مطلوبی انجام گردد، چرا که هزینه‌های مورد انتظار برای یک سازه شامل تمام هزینه‌های ناشی از زلزله‌های محتمل با شدت‌های مختلف می‌باشد. از این رو در ادامه از این رویکرد جهت تعیین آلفای بهینه استفاده خواهد شد.

۳- روش زمان دوام

روش زمان دوام را می‌توان یک آنالیز بار افزون دینامیکی دانست که تلاش می‌کند مقاومت لرزه‌ای سازه‌ها را با آنالیز آن‌ها تحت یک تحریک دینامیکی فزاینده‌ی از پیش طراحی شده بررسی کند. ایده روش زمان دوام برای اولین بار توسط دکتر استکانچی و همکاران ارائه

سازه‌های با پرپود طولانی مخصوصاً در نواحی نزدیک گسل که تحت تأثیر زمین لرزه‌های شدید می‌گیرند (نیروهای بیش از اندازه در میراگر و در نتیجه در سازه تولید شود. گریگوریان^۱ [۱۴] در سال ۲۰۱۴ نشان داده است که میراگرهای خطی هنگامی که در معرض یک سرعت ورودی بزرگ قرار می‌گیرند، نیروهای بزرگ‌تری را تجربه می‌کنند. شکل ۱ رابطه‌ی نیرو - سرعت را برای مقادیر مختلف توان آلفا به صورت کلی نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، حداکثر نیروی میراگر برای میراگر غیرخطی با توان سرعت کم‌تر از ۱ محدود شده است و با افزایش سرعت، نیروی میرایی در یک میراگر ویسکوز غیرخطی رشد کمتری دارد و در نتیجه از سازه در برابر نیروی میرایی بیش از اندازه محافظت می‌کند. این ویژگی، کارایی میراگر ویسکوز غیرخطی ($\alpha < 1$) را برای محدود کردن نیروی حداکثر میراگر و به حداقل رساندن خرابی‌های محتمل نشان می‌دهد [۱۴]. بر اساس یک معیار متداول، نیروی متناظر با سرعت ۱ m/s برای تعیین ظرفیت میراگرهای ویسکوز مورد استفاده قرار می‌گیرد. همانطور که ملاحظه می‌گردد رفتارهای متفاوت نشان داده شده در شکل ۱ در سرعت ۱ m/s منجر به نیروی یکسانی شده و می‌توان مشاهده کرد که با کاهش توان سرعت (آلفا) مقدار نیروی میرایی در سرعت‌های بیشتر ۱ m/s کاهش یافته و در سرعت‌های کمتر از ۱ m/s

1 Grigorian et al.

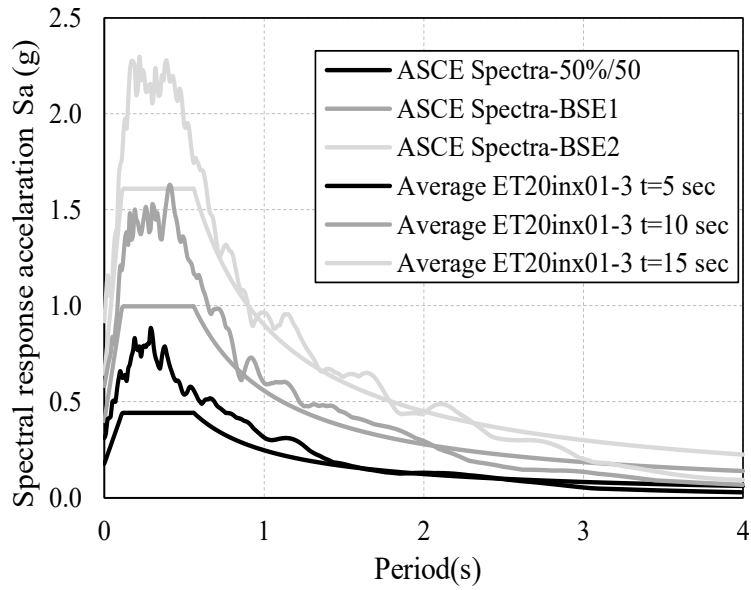


شکل ۲. تاریخچه تابع شتاب ETA20inx01

Fig. 2. ETA20inx01 acceleration function

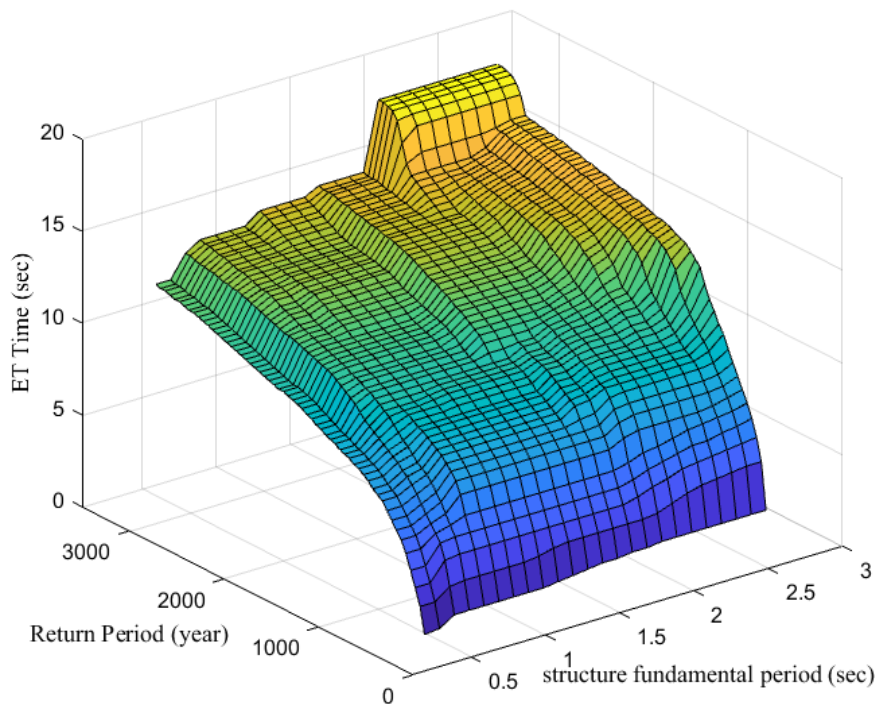
۳ با طیف‌های آیین‌نامه ASCE41-13 [۱۶] مقایسه شده است. مقایسه‌ی نتایج براساس مقادیر به دست آمده از تحلیل زلزله‌ها با نتایج زمان دوام در پنجره زمانی صفر تا زمان هدف انجام می‌شود. زمان هدف زمانی است که شدت تحریک ایجاد شده به وسیله‌ی تابع تحریک زمان دوام مساوی با شدت متوسط زلزله‌های مرجع می‌شود. برای تعیین زمان هدف و مقایسه‌ی شدت‌ها می‌توان از مفهوم طیف پاسخ شتاب استفاده کرد. از آنجایی که سطوح خطر مختلف را می‌توان با طیف پاسخ متناظر آن تعریف نمود، برای هر سطح خطر نیز می‌توان زمان هدف ET را به گونه‌ای تعیین کرد که طیف پاسخ رکورد زمان دوام از صفر تا آن زمان منطبق بر طیف هدف باشد. در اینجا زمان ET معادل برای دوره بازگشت مورد نظر (هدف) طوری تعیین شده است که طیف شتاب ET در بازه بین $0.2T$ تا $0.1T$ بالاتر از طیف هدف قرار بگیرد. طیف متناظر با سطوح خطر مختلف بر اساس طیف طراحی آیین‌نامه ASCE41-13 برای منطقه‌ی لس آنجلس و زمین نوع C استفاده شده است. با توجه به نحوه مقیاس‌سازی، رابطه‌ی بین زمان ET و دوره بازگشت خطر به پرپود سازه بستگی خواهد داشت. به بیان دیگر سازه‌های با دوره تناوب مختلف، برای یک سطح خطر زمان‌های معادل ET مختلفی خواهند داشت. رابطه‌ی بین زمان تحلیل ET و دوره بازگشت خطر برای پرپودهای سازه‌ای مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. با در دست داشتن این رابطه برای یک سازه خاص مقدار زمان تحلیل ET متناظر با هر سطح خطر به دست می‌آید.

شد که برگرفته از تست ورزش برای بیماران قلبی می باشد [۱۲]. در این روش سازه تحت یک شتاب‌نگاشت افزایشی قرار می‌گیرد و پاسخ‌های سازه نظیر تغییر مکان، تغییر مکان نسبی طبقات، تنش ایجاد شده در مقاطع، چرخش پلاستیک مفاصل و معیارهای خرابی مناسب دیگر در طول آنالیز اندازه گیری می‌شوند و سپس حداکثر مقدار پارامترهای پاسخ نسبت به زمان (حداکثر قدر مطلق پاسخ از شروع تا زمان مورد نیاز) ترسیم می‌گردد. در پژوهش‌هایی که تاکنون درباره توابع شتاب ماندوام صورت گرفته است، نشان داده شده است که لازمه‌ی موفقیت تحلیل زمان دوام تطابق مناسب طیف طرح مسئله‌ی مورد بررسی با طیف طرح هدف توابع شتاب زمان دوام در مرحله‌ی توسعه‌ی آن‌ها می باشد. سری رکوردهای زمان دوام مختلفی ارائه شده است که تفاوت عمده‌ی آن‌ها در طیف الگوی هدف آن‌ها می‌باشد. تفاوت دیگر دامنه پرپودهای پوشش داده شده در تولید آن‌ها است که در کاربردهای غیرخطی اهمیت پیدا می‌کند. سایر تفاوت‌ها در طول رکورد، گام زمانی و نحوه‌ی مقیاس اولیه می‌باشد. در این مقاله از توابع شتاب EAT20inx01-3 استفاده شده است. این توابع بر اساس شتاب نگاشت‌های واقعی معرفی شده در FEMA440 [۱۵] برای زمین نوع C (معادل خاک نوع ۲ استاندارد ۲۸۰۰ ایران) ساخته شده‌اند. برای نمونه تابع شتاب ETA20inx01 در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین طیف پاسخ شتاب متوسط با میرایی ۵٪ در زمان‌های مختلف برای شتاب‌نگاشت‌های ETAinx01-3 در شکل



شکل ۳. مقایسه طیف پاسخ میانگین 3-ETAinx01 در زمان‌های مختلف با طیف‌های آیین نامه 13-ASCE41

Fig. 3. Comparison of mean response spectra of ET20inx01-3 at different times with ASCE41-13 spectra



شکل ۴. زمان تحلیل ET در مقابل دوره بازگشت خطر و پریرود مود اول سازه

Fig. 4. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with outer diameter of 220 mm and wall thickness of 4.8 mm

جدول ۱. حدود اندیس خرابی (دریفت و شتاب طبقه) برای قاب های خمشی [۲۰ و ۱۹]

Table 1. Limits for damage indices (drift and floor acceleration) for moment frames [19, 20]

Performance level	Damage states	Drift ratio limit ATC-13(%)	Floor acceleration limit (g) Elenas and Meskouris
I	None	$\Delta \leq 0.2$	$a_{floor} \leq 0.05$
II	Slight	$0.2 < \Delta \leq 0.5$	$0.05 < a_{floor} \leq 0.10$
III	Light	$0.5 < \Delta \leq 0.7$	$0.10 < a_{floor} \leq 0.20$
IV	Moderate	$0.7 < \Delta \leq 1.5$	$0.20 < a_{floor} \leq 0.80$
V	Heavy	$1.5 < \Delta \leq 2.5$	$0.80 < a_{floor} \leq 0.98$
VI	Major	$2.5 < \Delta \leq 5$	$0.98 < a_{floor} \leq 1.25$
VII	Destroyed	$5.0 < \Delta$	$1.25 < a_{floor}$

۴- ارزیابی هزینه

۴-۱- هزینه دوره عمر

محاسبه ی هزینه دوره عمر (C_{LC}) در گام اول نیازمند تعیین و کمی سازی میزان خرابی که در طول یک زلزله برای سازه رخ می دهد می باشد. خرابی ممکن است با استفاده از اندیس (DI) خرابی های مختلفی بیان شود که مقادیر این اندیس ها متناظر با حالات خرابی مختلف یا حالات حدی^۳ مختلف خواهد بود. مطالعات بسیاری بر روی اندیس های خرابی مختلف در سازه های بتنی و فولادی انجام شده است [۱۸]. خرابی در مبث LCCA، علاوه بر خرابی های سازه های بلکه خرابی های غیرسازه ای را نیز شامل می شود و تأسیسات، معماری، وسایل الکتریکی و مکانیکی و همچنین مبلمان، تجهیزات و سایر محتویات ساختمان از اجزای غیرسازه های محسوب می شود. حداکثر دریفت بین طبقه ای^۴ (θ) به عنوان یک پارامتر پاسخ مناسب برای تعیین خرابی سازه ای شناخته شده است. یک نمونه ارتباط بین نسبت دریفت و حالات حدی استفاده شده در ادبیات فنی در جدول ۱ بر اساس ATC-13 [۱۹] آورده شده است. از طرف دیگر پارامتر پاسخ مناسب برای بررسی خرابی های غیرسازه های و محتویات ساختمان حداکثر شتاب طبقه (acc) تعیین شده است. برای مثال ارتباط بین شتاب طبقه و حالات حدی مختلف بر اساس

تحلیل هزینه دوره عمر یا LCCA ابزاری برای محاسبه هزینه ی مورد نیاز برای نگهداری یک تولید، سازمان یا یک سازه در یک بازه زمانی مشخص که دوره عمر^۱ نامیده می شود، می باشد. هزینه دوره ی عمر یک سازه شامل مجموع ارزش زمان حال^۲ تمام هزینه های مورد انتظار در ارتباط با مدیریت و نگهداری یک سازه در دوره ی عمر خود است. برای سیستم های سازه ای هزینه ی دوره عمر معمولاً مربوط به صدمات ناشی از سوانح طبیعی مانند زلزله یا طوفان می باشد. در حالت کلی هزینه ی دوره ی عمر با تمام هزینه های محتمل که ممکن است عملکرد سازه را تحت تاثیر قرار دهد، مرتبط است. از منظر نسل سوم روش های طراحی بر اساس عملکرد، طراحی سازه بایستی با در نظر گرفتن هزینه های اقتصادی مستقیم و صدمات جانی و اجتماعی انجام شود [۱۷]. در رویکرد طراحی براساس ارزش، هزینه های اولیه ی ساخت و خسارت های لرزه ای در طول عمر سازه به صورت مستقیم توأمأ در انتخاب گزینه ی طراحی مناسب در نظر گرفته می شوند. همچنین هزینه و مدت زمانی که برای تعمیر سازه صرف می شود، صدمات وارده به ساکنین سازه و تعداد تلفات جانی می توانند به عنوان خسارت های لرزه ای در نظر گرفته شوند.

3 Limit states

4 Maximum Inter-story Drift

1 Life time

2 Present value

جدول ۲. فرمول‌های محاسبه مولفه‌های هزینه به دلار [۱۹ و ۲۲]

Table 2. Formula for cost calculations in US Dollars [19, 22]

Cost Category	Calculation Formula	Basic Cost
Damage repair	Replacement cost × floor area × mean damage index	1500 mu/m ²
Loss of content	Unit content cost × floor area × mean damage index	500 mu/m ²
Rental	Rental × gross leasable area ^b × disruption period × loss of function index	10 mu/month/m ²
Income	Income rate × gross leasable area × disruption period × down time index	2000 mu/person
Minor injury	Minor injury cost per person × floor area × occupancy rate ^a × expected minor injury rate	2000 mu/person
Serious injury	Serious injury cost per person × floor area × occupancy rate × expected serious injury rate	2 × 10 ⁶ mu/person
Human fatality	Death cost per person × floor area × occupancy rate × expected death rate	2.8 × 10 ⁶ mu/person

این خرابی‌ها به صورت پارامترهای اقتصادی به مؤلفه‌های محلی و اجتماعی زیادی بستگی دارد و دشوارترین بخش این روند کمی‌سازی هزینه‌ی تلفات جانی است که تأثیر بسزایی در تحلیل هزینه‌ی عمر نیز خواهد داشت. هزینه‌ی حالت حدی (C_{LS})، برای حالت حدی i ام C_{LS}^i به صورت زیر می‌تواند بیان شود.

$$C_{LS}^i = C_{dam}^i + C_{con}^i + C_{ren}^i + C_{inc}^i + C_{inj}^i + C_{fat}^i \quad (4)$$

$$C_{con}^i = C_{cin}^{i,\theta} + C_{con}^{i,acc} \quad (5)$$

که C_{dam}^i هزینه تعمیر خرابی‌های سازه‌ای، $C_{con}^{i,\theta}$ هزینه از دست رفتن محتویات ناشی از دریافت، $C_{con}^{i,acc}$ هزینه از دست رفتن محتویات ناشی از شتاب طبقه می‌باشد. C_{ren}^i هزینه از دست رفتن کرایه، C_{inc}^i هزینه از دست رفتن درآمد ساختمان، C_{inj}^i هزینه جراحات وارده به ساکنین و C_{fat}^i هزینه تلفات جانی است. فرمولهای محاسبه‌ی هر یک از مؤلفه‌های هزینه در جدول ۲ آورده شده است. عبارت اول در هر فرمول در ستون آخر این جدول به عنوان هزینه‌ی پایه^۲ آورده شده است [۲۱]. مقادیر متوسط اندیس خرابی^۳، هزینه‌ی

کاری از الناس و مسکوریس^۱ [۲۰] در ستون آخر همین جدول ارائه شده است.

بنابراین هزینه دوره عمر C_{LC} به صورت مجموع هزینه‌ی محاسبه شده براساس اندیس خرابی‌های مختلف خواهد بود. DI در رابطه زیر تعداد اندیس خرابی استفاده شده در تحلیل هزینه دوره عمر می‌باشد.

$$C_{LC}(t,s) = \sum_{i=1}^{DI} C_{LC}^i(t,s) \quad (2)$$

هر هزینه‌ی خرابی ناشی از یک اندیس خرابی C_{LC}^{DI} ، تابعی است از مجموع هزینه‌های حالات حدی که در رابطه زیر دیده می‌شود.

$$C_{LC}^{DI}(t,s) = \sum_{i=1}^n f(C_{LS}^i, t, s) \quad (3)$$

در این رابطه n تعداد حالات حدی در نظر گرفته شده برای هر اندیس خرابی است. مقدار C_{LS} شامل هزینه‌های تعمیر، هزینه‌ی از دست رفتن محتویات، هزینه‌های مربوط به کرایه‌ی ساختمان و از دست رفتن درآمد ساختمان در اثر زلزله می‌شود. کمی‌سازی

2 Basic Cost
3 Mean Damage Index

1 Elenas & Meskouris

جدول ۳. پارامترهای حالات حدی برای محاسبه ی هزینه [۲۴]

Table 2. Parameters of limit states for cost calculations [24]

Limit State	FEMA-227 [21]			ATC-13 [19]		
	Mean Damage Index (%)	Expected minor injury rate	Expected serious injury rate	Expected death rate	Loss of function (%)	Down time (%)
(I) - None	0	0	0	0	0	0
(II) - Slight	0.5	3.0E-5	4.0E-6	1.0E-6	0.9	0.9
(III) - Light	5	3.0E-4	4.0E-5	1.0E-5	3.33	3.33
(IV) - Moderate	20	3.0E-3	4.0E-4	1.0E-4	12.4	12.4
(V) - Heavy	45	3.0E-2	4.0E-3	1.0E-3	34.8	34.8
(VI) - Major	80	3.0E-1	4.0E-2	1.0E-2	65.4	65.4
(VII) - Collapse	100	4.0E-1	4.0E-1	2.0E-1	100	100

(شکل ۵-ب). مقادیر پاسخ سازه نیز در گام بعدی با استفاده از روابط ذکر شده در جدول ۲ و رابطه خطی جدول ۳ به مؤلفه های هزینه تبدیل می شود. حال با جابجایی محور افقی و عمودی نرخ فراگذشت سالیانه هر مؤلفه هزینه به صورت نموداری با نام منحنی خسارت "Loss Curve" به دست می آید (شکل ۵-ب).

۴-۲- هزینه ی اولیه

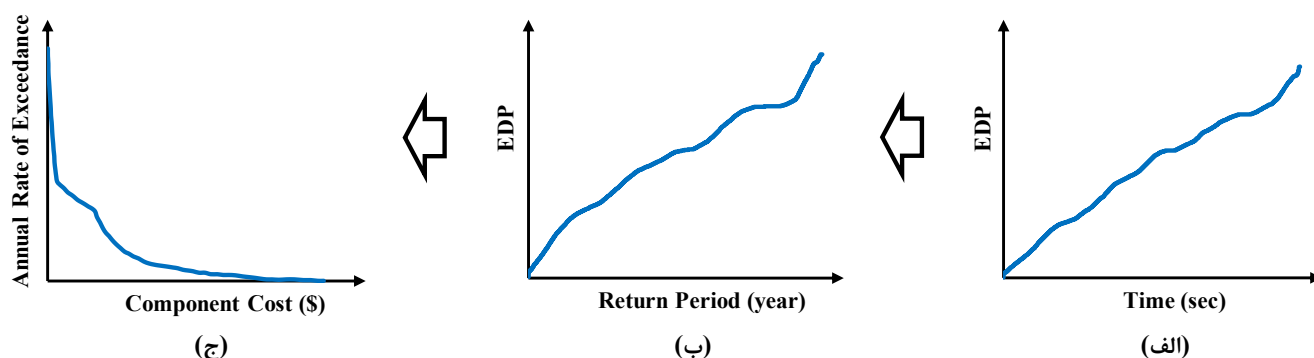
هزینه ی اولیه^۷ معمولاً هزینه ی ساخت یک سازه ی جدید یا هزینه ی بهسازی یک سازه موجود است. در مثال های طراحی مورد بررسی که قاب های فولادی مجهز به میراگر ویسکوز است، هزینه ی اولیه مربوط به هزینه ی زمین، مصالح، هزینه ی نیروی انسانی برای ساخت سازه و همچنین هزینه ی خرید میراگرهای ویسکوز و هزینه ی نصب آن است. از آنجایی که هزینه ی زمین و اجزای غیر سازه های برای تمام گزینه های طراحی یکسان است می توانند از محاسبات هزینه ی کل حذف شوند. بنابراین هزینه ی اولیه معادل \$۶۰۰ بر متر مربع برای کل مساحت زیربنای سازه در نظر گرفته می شود. همچنین در سازه هایی که در طراحی آن ها از میراگرهای ویسکوز استفاده می شود، تهیه، نصب و نگهداری میراگرهای ویسکوز، هزینه اولیه ی قابل توجهی دارند و با توجه به این که در این مطالعه نیاز به

عدم فعالیت ساختمان^۱، زمان از کار افتادن ساختمان^۲، نرخ جراحات سطحی مورد انتظار و نرخ جراحات شدید مورد انتظار^۳ و نرخ مرگ و میر مورد انتظار^۴ بر اساس مطالعه ای توسط ون و کنگ^۵ [۲۲] و لاگروس^۶ [۲۳] انتخاب شده اند. همچنین در جدول ۳ شدت خرابی وابسته به هر حالت حدی بر اساس ATC-13 [۱۹] و FEMA-22 [۲۱] آورده شده است.

بر اساس روش ارائه شده توسط بسیم و همکاران [۱۱] منحنی خسارت را می توان با استفاده از یک روش کاربردی و ساده از روی منحنی ET به دست آورد. در گام اول سازه تحت سه شتاب نگاشت زماندوام تحلیل می شود. متوسط نتایج در شکلی به عنوان "منحنی ET" که در آن زمان تحلیل در محور افقی و پارامتر پاسخ در محور قائم است نشان داده می شود (شکل ۵-الف). نتایج تحلیل می تواند با استفاده از روش میانگین گیری متحرک هموار شود. در گام بعدی با استفاده از رابطه ی ذکر شده در شکل ۴ محور افقی به دوره بازگشت خطر یا در حالت عکس احتمال فراگذشت سالانه نگاشت می شود. این نمودار مقدار پاسخ سازه متناظر با هر دوره بازگشت را ارائه می کند

- 1 Loss of function
- 2 Down time
- 3 Expected serious injury rate
- 4 Expected death rate
- 5 Wen & Kang
- 6 Lagaros

7 Initial Cost



شکل ۵. طرح کلی به دست آوردن منحنی خسارت با استفاده از روش زمان دوام در سازه ۷ طبقه بدون میراگر

Fig. 5. Schematics of the procedure to calculate the loss curve using the ET method for the 7 story frame without dampers

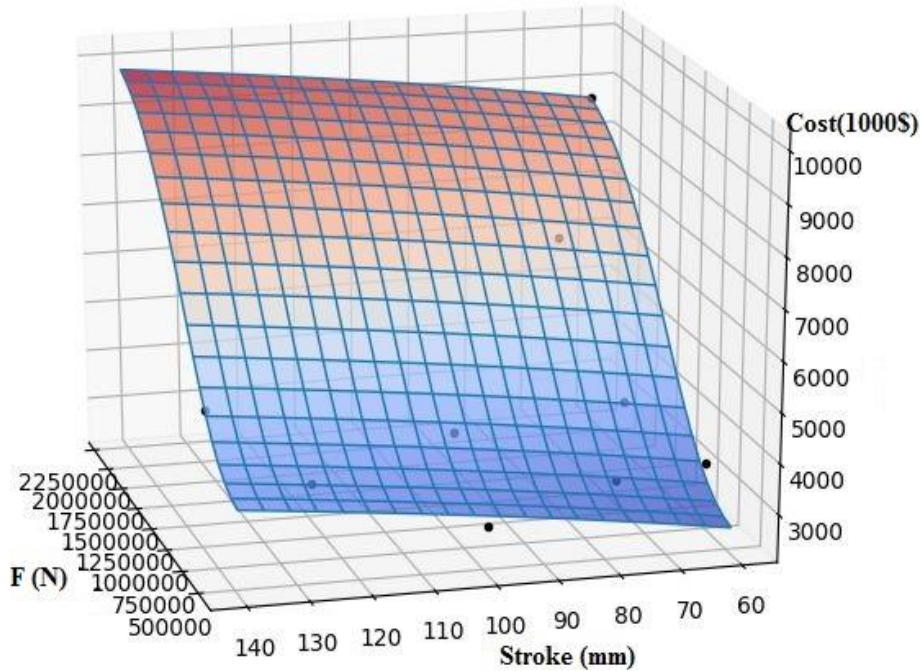
جدول ۴. مشخصات میراگرهای تولید شده در شرکت MAURER بر اساس نیروی قابل تحمل و جابجایی دو سر میراگر

Table 4. ET analysis time vs hazard return period and structure fundamental period

No.	type	damper force	Movement total	Weight	Net Price
		ULS(kN)	ex (±mm)		
1	MHD	2218	60	480	3004.32
2	MHD	1023	70	170	3163.64
3	MHD	743	60	115	4278.88
4	MHD	751	75	80	8682.94
5	MHD	441	100	70	3379.86
6	MHD	1501	75	380	6919.04
7	MHD	882	100	180	4165.08
8	MHD	929	140	220	4882.02
9	MHD	565	127	150	3914.72

شرکت Maurer میراگرهای ویسکوز را به ازای مقادیر مختلف آلفا تولید می‌نماید. همانطور که در توضیحات مربوط به میراگرهای ویسکوز غیرخطی ذکر شد، این میراگرها در سرعت 1 m/s به ازای هر مقدار آلفا نیروی یکسانی دارند و هزینه میراگر ویسکوز نیز به ازای نیروی آن در 1 m/s تعیین می‌گردد. بنابراین با استفاده از داده‌های جدول ۴ که توسط شرکت مائورر ارائه شده است، می‌توان یک پوسته برای تخمین هزینه‌ی اولیه میراگر بر اساس نیروی میراگر در سرعت 1 m/s و جابجایی دو سر آن برآورد داد. معادله‌ی به دست آمده برای پوسته مورد نظر با استفاده از رگرسیون در رابطه ۶ آورده شده است.

برآورد هزینه اولیه‌ی میراگر ویسکوز در فرآیند تحلیل هزینه دوره عمر وجود دارد و به دلیل این که در ادبیات فنی مربوطه مدل هزینه‌ی مناسبی برای برآورد هزینه اولیه‌ی این سیستم‌ها تاکنون گزارش نشده است، با مطالعه‌ی که بر روی محصولات شرکت (MHD) Maurer انجام شد مدل هزینه‌ی اولیه بر حسب متغیرهای نیروی قابل تحمل توسط میراگر و جابجایی دو سر میراگر ارائه گردید. برای این کار قیمت ۹ نمونه متفاوت میراگر ویسکوز با مشخصات نیروی قابل تحمل توسط میراگر و جابجایی مجاز دو سر آن‌ها بر اساس استعلام قیمت از شرکت مربوطه در نظر گرفته شده است.



شکل ۶. پوسته برازش شده بر هزینه‌های اولیه میراگرهای ویسکوز بر اساس داده‌های موجود

Fig. 6. The surface fitted to the available price data for viscous dampers

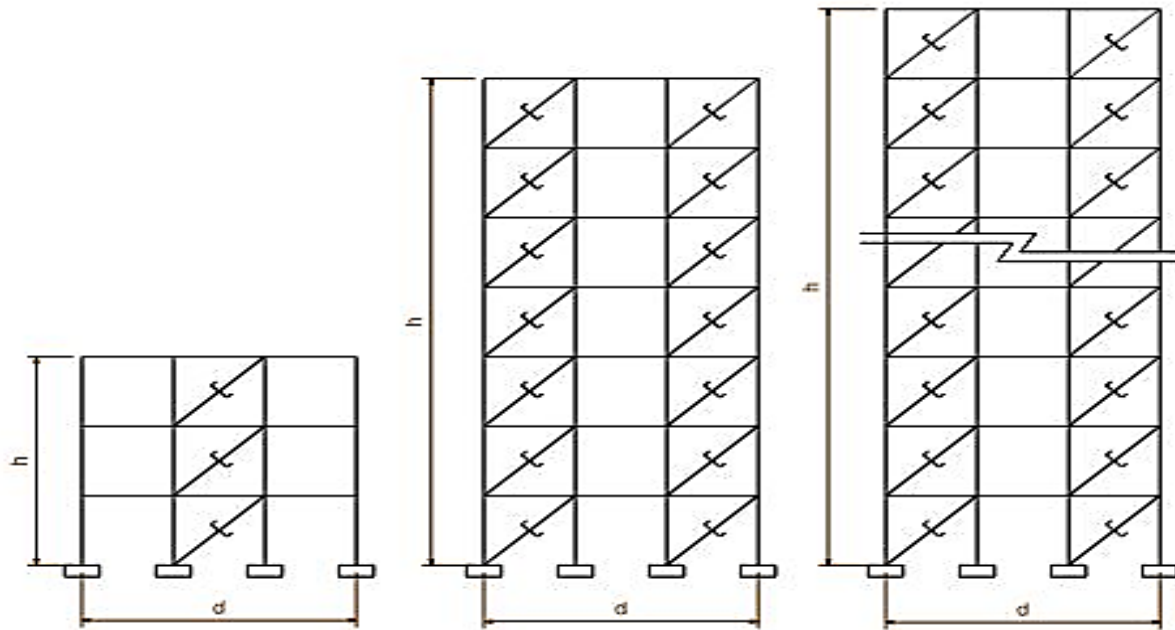
۵۰ درصد نیروی زلزله طراحی شده‌اند. برای بررسی رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها و انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی از نرم‌افزار OpenS-ees استفاده شده است. برای مدل‌سازی در نرم افزار از المان‌های تیر-ستون غیرخطی بر مبنای نیرو ForceBeamColumn و از رفتار غیرخطی گسترده با مقاطع Fiber استفاده شده است. مصالح اختصاص داده شده به قاب‌های فولادی، مصالح تک محوری Steel01 می‌باشد. مصالح فولادی تک محوری دو خطی با سخت شوندهگی سینماتیک و سخت شوندهگی ایزوتروپیک اختیاری به کار می‌رود. در مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق شیب قسمت پلاستیک ۳ درصد شیب قسمت ارتجاعی در نظر گرفته شده است. همچنین برای مدل کردن میراگرهای ویسکوز از مصالح ViscousDamper که بر اساس مدل Maxwell می‌باشد، استفاده شده است. در این مصالح میراگر و بادبند حامل آن همزمان با یکدیگر مدل شده‌اند. آنچه در این سازه اهمیت دارد این است که تحت شتاب‌نگاشت‌های وارده، سازه سطوح عملکرد مورد انتظار آیین نامه ASCE41-13 را ارضا نمی‌کند. بنابراین تلاش خواهد شد تا با نصب میراگر ویسکوز در سازه این ضعف

$$\begin{aligned}
 MHD \text{ Price} = & 6295.552 \\
 & \times \exp(0.5 \times (((\log(F) \times 1000 - 14.732) / -0.545)^2 \\
 & + (1.06E + 47) \\
 & \times \exp(-0.5 \times (((\log(stroke) - 464.046) / -32.452)^2))
 \end{aligned} \quad (6)$$

که در این رابطه پارامترهای F و $stroke$ به ترتیب بیانگر نیروی ایجاد شده در میراگر در سرعت 1 m/s می‌باشد و جابجایی مجاز دو سر میراگر در امتداد محور طولی طوری در نظر گرفته شده است. جابجایی مجاز نباید از مقدار مورد نیاز به دست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی سازه و از 60 میلی‌متر کمتر باشد. با استفاده از این رابطه می‌توان هزینه اولیه میراگر ویسکوز را بر حسب واحد پولی دلار محاسبه کرد. در شکل زیر پوسته در نظر گرفته شده برای محاسبه هزینه‌ی اولیه میراگر ویسکوز ارائه شده است.

۵- مدل‌های سازه‌ای

در این پژوهش سه مدل قاب خمشی فولادی متوسط 15 و 7 ، طبقه‌ی سه دهانه مورد بررسی قرار گرفته است. این سازه‌ها دارای ضعف در طراحی اولیه بوده و به روش استاتیکی معادل برای



شکل ۷. پیکربندی قاب های خمشی مجهز به میراگر و سکوز برای سازه های مورد مطالعه

Fig. 7. Schematics of the studied moment frames with dampers

۶- رکوردهای زلزله

به منظور انجام تحلیل های تاریخچه زمانی غیرخطی و مقایسه نتایج آن با رکوردهای زمان دوام از ۲ گروه ۱۲ تایی شتابنگاشت استفاده شده است. گروه اول شامل ۱۲ رکورد زلزله حوزه دور از گسل می باشد که فاصله آن ها تا نزدیکترین گسل بیش از ۲۰ کیلومتر است. گروه دوم رکوردهای نزدیک گسل بدون پالس با حداکثر فاصله ۱۵ کیلومتر تا گسل می باشند. تمامی این رکوردها، رکوردهای پیشنهادی FEMA-P695 [۱۵] هستند. مشخصات رکوردهای انتخاب شده و ضرایب مقیاس آن ها در جدول ۵ و جدول ۶ آورده شده است. کلیه رکوردها با توجه به دستورالعمل ASCE41-13 [۱۶] به گونه ای مقیاس شده اند که در پیوندهای در محدوده $0.2T$ تا $1.5T$ طیف پاسخ متوسط رکوردهای زلزله پایین تر از طیف طراحی قرار نگیرد.

۷- روش طراحی میراگر و سکوز بر مبنای انرژی (روش پیشنهادی آیین نامه 10-ASCE7)

یکی از روش هایی که برای طراحی میراگرهای و سکوز کاربرد

برطرف شود و سازه بتواند پاسخگوی سطح عملکرد مورد انتظار آیین نامه باشد. طراحی این سازه ها براساس پاسخگویی در مقابل نیروی وزنی با استفاده از روش LRFD طبق آییننامه AISC360-10 [۲۵] انجام شده است. ارتفاع طبقات $3/2$ متر و عرض دهانه ها ۶ متر می باشد و تمامی تکیه گاه ها گیردار هستند. بارگذاری کلی در این سازه به عنوان یک ساختمان تجاری بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران انجام شده است. تیرها و ستون ها طی روند طراحی از بین پروفیل های W انتخاب شده اند. مصالح فولادی با تنش تسلیم $f_y = 4235 \text{ Mpa}$ و مدول الاستیسیته $E = 200 \text{ GPa}$ می باشند. مقدار بار مرده برای طبقات 45 kN/m و بار زنده 5 kN/m و مقدار بار نقطه ای برای طبقات 45 kN و برای بام 15 kN است. مساحت اختصاص یافته در قاب دو بعدی برای هر طبقه 140 متر مربع می باشد. هندسه کلی قاب های مورد مطالعه در شکل ۷ آورده شده است. همچنین مقدار پیوند سازه سه، هفت و پانزده طبقه به ترتیب $0.97/1$ ، $3/37$ و $89/1$ ثانیه به دست آمده است.

جدول ۵. رکوردهای حوزه-دور معرفی شده در FEMA-P695 [۱۵]

Table 5. Far-field ground motion records introduced in FEMA-P695 [15]

ID No.	Earthquake			Recording station		PGA	Scale Factor
	Magnitude	Year	Name	Name	Comp		
1	6.7	1994	Northridge	Beverly Hills - Mulhol	279	0.52	1.35
2	6.7	1994	Northridge	Canyon Country-WLC	270	0.48	1.45
3	7.1	1999	Duzce, Turkey	Bolu	090	0.82	0.85
4	6.5	1979	Imperial Valley	Delta	352	0.35	2.00
5	6.5	1979	Imperial Valley	El Centro Array #11	230	0.38	1.80
6	6.9	1995	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	000	0.51	1.37
7	6.9	1995	Kobe, Japan	Shin-Osaka	000	0.24	2.91
8	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Duzce	270	0.36	1.94
9	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Arcelik	000	0.22	3.18
10	7.3	1992	Landers	Yermo Fire Station	270	0.24	2.91
11	7.3	1992	Landers	Coolwater	TR	0.42	1.66
12	6.9	1989	Loma Prieta	Capitola	000	0.53	1.32

جدول ۶. رکوردهای حوزه-نزدیک بدون پالس معرفی شده در FEMA-P695 [۱۵]

Table 6. No-pulse near-field ground motion records introduced in FEMA-P695 [15]

ID No.	Earthquake			Recording station		PGA	Scale Factor
	Magnitude	Year	Name	Name	Comp		
1	7.01	1992	Cape Mendocino	Cape Mendocino	000	1.49	1.00
2	7.62	1999	Chi-chi Taiwan	TCU067	E	1.00	1.91
3	7.9	2002	Denali Alaska	Taps Pump#10	047	0.33	1.91
4	6.8	1976	Gazli Ussr	Karakyr	000	0.70	1.18
5	6.53	1979	Imperial Valley	Bonds Corner	230	0.77	1.35
6	6.53	1979	Imperial Valley	Chihugua	012	0.26	0.85
7	7.51	1999	Kocaeli Turkey	yarimcan	060	0.22	1.37
8	6.93	1989	Loma Prieta	Corralitos	000	0.64	1.66
9	6.93	1989	Loma Prieta	Bran	000	0.45	1.82
10	6.76	1985	Nahani Canada	Site 1	010	1.10	0.88
11	6.69	1994	Northridge	La-Sepulveda	270	0.75	0.94
12	6.69	1994	Northridge	saticoy	090	0.34	1.20

طبقه (K_i) در نظر گرفته می‌شود:

$$C_i = \varepsilon K_i \quad (۸)$$

مقدار سختی جانبی هر طبقه را میتوان با اعمال یک توزیع بار جانبی استاتیکی و سپس محاسبه نسبت نیروی برشی به تغییر مکان نسبی طبقه متناظر به دست آورد [۲۹]. بر اساس دو روش (توزیع یکنواخت UD و توزیع میرایی بر اساس سختی SPD) مقدار ضرایب میرایی در حالت خطی میراگر برای سازه‌ها در شکل ۸ آورده شده است.

۸- روش طراحی میراگر ویسکوز بر اساس جابجایی

در این بخش ویژگی‌های میراگر ویسکوز مورد نیاز برای رسیدن به سطح عملکرد مورد انتظار در در دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ سال با استفاده از روش طراحی مبتنی بر جابجایی مستقیم (DBD) ارائه شده است [۳۱]. بر اساس این روش مشخصه‌های میراگر ویسکوز با تخمین حداکثر نیروی برشی طبقات ساختمان بهسازی نشده در طول ارتفاع تعیین می‌شوند. فرآیند طراحی شامل چهار مرحله است:

گام اول: مشخص کردن حداکثر جابجایی بین طبقه ای (IDR)^۵ و حداکثر نیروی برشی V_i^{max} در ارتفاع سازه بهسازی نشده برای سطح خطر زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ سال با استفاده از تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی (NLRHA)^۶.

گام دوم: تعیین تغییر مکان طبقات بر اساس طبقه بحرانی بر اساس روابط زیر.

$$\Delta_i^R = \omega_\theta \theta_c h_i \left(\frac{4H - h_i}{4H - h_1} \right) \quad (i = 1, \dots, n) \quad (۹)$$

$$\omega_\theta = 1.15 - 0.0034H \leq 1 \quad (۱۰)$$

وسعی دارد، استفاده از روش طراحی بر مبنای انرژی است که در آیین نامه ASCE7-10 [۲۶] نیز مورد استفاده قرار گرفته است. این روش نسبت به سایر روش‌ها محدودیت کمتری داشته و برای طراحی غیرخطی میراگرها مناسب است. میرایی ویسکوز (β_{vm}) برای زمان تناوب مود m ام سازه (T_m) تحت شرایط الاستیک می‌تواند با استفاده از رابطه (۷) که توسط ویتاکر^۱ و همکاران [۲۷] ارائه گردیده است، تخمین زده شود.

$$\beta_{v1} = \frac{T \sum_j C_j \phi_j^2 f_j^2}{4\pi \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (۷)$$

در رابطه فوق f_j ضریب بزرگ‌نمایی تغییر مکان برای میراگر j ام می‌باشد که برای میراگرهایی که تحت زاویه θ_j نسبت به افق قرار گرفته‌اند برابر با $\cos \theta_j$ است. ϕ_j نیز بیانگر تغییر مکان نسبی مودی برای دو انتهای میراگر است. با در نظرگیری میرایی ویسکوز طراحی در مود ارتعاشی اول سازه $\beta_{v1} = 10\%$ ضرایب میرایی برای هر میراگر محاسبه شده است. از آنجایی که در آیین نامه‌های طراحی، روشی برای توزیع مقدار C محاسبه شده در سازه وجود ندارد، بنابراین در طراحی میراگرها توزیع C در طبقات به صورت مساوی (توزیع یکنواخت UD) انجام می‌شود که ممکن است یک رویکرد مناسب نباشد. بنابراین توزیع‌های متناسب با سختی و یا جرم به دلیل آنکه منجر به یک ماتریس میرایی از نوع رایلی می‌گردند که هیچ درگیری را میان مودها ایجاد نمی‌کند، مورد توجه هستند. همچنین ترومبیتی و سیلوستری^۲ [۲۸] نشان داده‌اند که یک توزیع متناسب با جرم از لحاظ تئوریک بسیار موثر است، اما می‌تواند از لحاظ اجرایی غیر عملی باشد. توزیع میراگرهای الاستومریک با میرایی متناسب با سختی (SPD) هر طبقه به وسیله لی و همکاران^۳ [۲۹] و کاراواسیلیس و همکارانش^۴ [۳۰] پذیرفته شده و نشان داده شده است که توزیع نیازهای لرزه‌ای در امتداد ارتفاع قاب‌های خمشی در این حالت یک توزیع نسبتاً یکنواخت است. در توزیع متناسب با سختی، میرایی در طبقه i ام (C_i) متناسب با سختی جانبی آن

- 1 Wittaker et al.
- 2 Trombetti & Silvestri
- 3 Lee & et al.
- 4 Karavasilis & et al.

5 Interstory Drift Ratio
6 Non-Linear Response History Analysis

میراگرهای خطی طراحی شده برای هر کدام از سازه ها تحت میانگین رکوردهای توابع شتاب ۳-ETA20inx01 در سطح خطر ۴۷۵ سال بیان شده است. مقدار ضرایب میرایی به دست آمده بر مبنای روش DBD برای سازه ها در شکل ۷ آورده شده است. در روش DBD مقدار میرایی ویسکوز کل مورد نیاز برای رسیدن به سطح عملکرد مورد انتظار در دوره‌ی بازگشت مورد نظر تعیین می‌شود. لذا انتظار می‌رود میرایی معادل کل سازه در این روش با دو روش قبلی (UD و SPD) متفاوت باشد که این موضوع در شکل ۸ قابل بررسی می‌باشد.

۹- طرح بهینه میراگرهای ویسکوز

هدف اصلی این مقاله معرفی یک متد برای طراحی سازه‌های فولادی مجهز به میراگر ویسکوز بر اساس هزینه دوره عمر می‌باشد. در این روش مفهوم سود و زیان مستقیماً در روند طراحی وارد شده و سعی می‌شود سازه‌ی به دست آمده کم‌ترین هزینه کل را در دوره عمر خود داشته باشد. بنابراین نیروی قابل تحمل توسط میراگر در سرعت ۱ m/s (به عنوان نماینده‌ی مقدار ضریب میرایی C میراگر) در طبقات مختلف به عنوان پارامترهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک تک هدفه سعی در حداقل کردن هزینه‌ی کل (مجموع هزینه اولیه و هزینه دوره عمر) می‌نماییم. در طی فرآیند بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک، پاسخ سازه‌ی هر گزینه‌ی طراحی به زلزله‌های محتمل در دوره‌ی عمر آن با شدت‌های مختلف توسط روش زمان دوام تخمین زده شده و سپس هزینه‌های مورد انتظار توسط تحلیل هزینه دوره عمر (LCCA) محاسبه می‌شود. بدین منظور میراگرهای ویسکوز در حالت خطی و غیرخطی برای سازه‌های قاب خمشی ۱۵ و ۳،۷ طبقه به صورت بهینه طراحی شده‌اند. در ابتدا المان‌های میراگر ویسکوز در حالت خطی به صورت بهینه طراحی شده است. همچنین در گام بعدی توان سرعت آلفا نیز وارد پارامترهای بهینه‌سازی شده و المان‌های میراگر و توان سرعت آلفا به طور همزمان به صورت بهینه برای حالت غیرخطی طراحی شده‌اند.

الگوریتم ژنتیک شامل ۵ قسمت اصلی مقداردهی اولیه‌ی جمعیت، تابع برازش^۱، انتخاب^۲، جابجایی^۳ و جهش^۴ می‌باشد. در

که در رابطه‌های بالا Δ_i^R جابجایی هدف در طبقه‌ی i ام، ω_θ ضریب کاهش برای موده‌های بالاتر، θ_c دریفت مجاز (٪)، h_i ارتفاع طبقه i ام، H ارتفاع کل سازه است.

گام سوم: مشخص کردن جابجایی سیستم یک درجه آزادی معادل، در طراحی سازه بر اساس روش DBD از جابجایی سیستم یک درجه آزادی معادل استفاده شده است. Δ^R تغییر مکان هدف سازه بهسازی شده و Δ^{UR} تغییر مکان بهسازی نشده در این سیستم هستند که با روابط زیر محاسبه می‌گردند.

$$\Delta^R = \sum_{i=1}^n m_i (\Delta_i^R)^2 / \sum_{i=1}^n m_i \Delta_i^R \quad (11)$$

$$\Delta^{UR} = \sum_{i=1}^n m_i (\Delta_i^{UR})^2 / \sum_{i=1}^n m_i \Delta_i^{UR} \quad (12)$$

گام چهارم: محاسبه ثابت میرایی برای هر طبقه که میرایی ویسکوز مکمل مورد نیاز بین جابجایی بهسازی شده و جابجایی بهسازی نشده با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد. جابجایی حداکثر میراگر نیز با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود. در نهایت ثابت میرایی برای هر طبقه با استفاده از رابطه (۱۵) به دست می‌آید.

$$\xi_{req} = \left(\left(\frac{\Delta^{UR}}{\Delta^R} \right)^2 \times 10 \right) - 10 \quad (13)$$

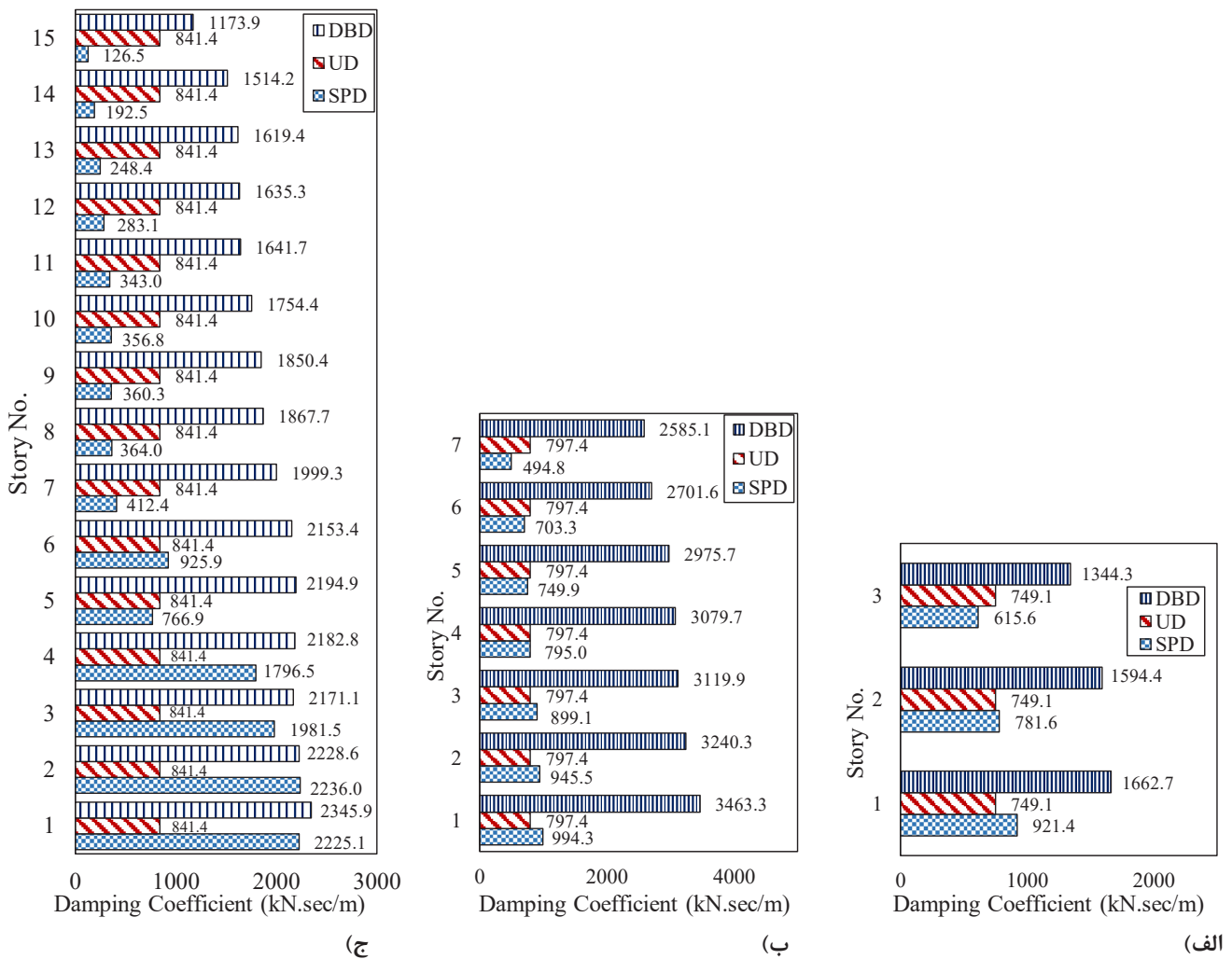
$$\Delta_i^d = \Delta_i^R - \Delta_{i-1}^R \quad (i = 1, \dots, n) \quad (14)$$

$$C_i^{NL} = \left(\frac{\lambda \xi_{req} T_1^\alpha}{(2\pi)^\alpha \cos(\theta)} \right) \frac{V_i^{max}}{(\Delta_i^d)^\alpha} \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \Gamma\left(\frac{\alpha+3}{2}\right) / \left(\frac{\alpha+2}{2}\right) \quad (16)$$

در رابطه (۱۶) با در نظر گیری $\alpha = 1$ مقدار λ برابر ۱ بوده و میراگر به صورت خطی عمل خواهد کرد. در ادامه مشخصات

- 1 Fitness Function
- 2 Selection
- 3 Crossover
- 4 Mutation

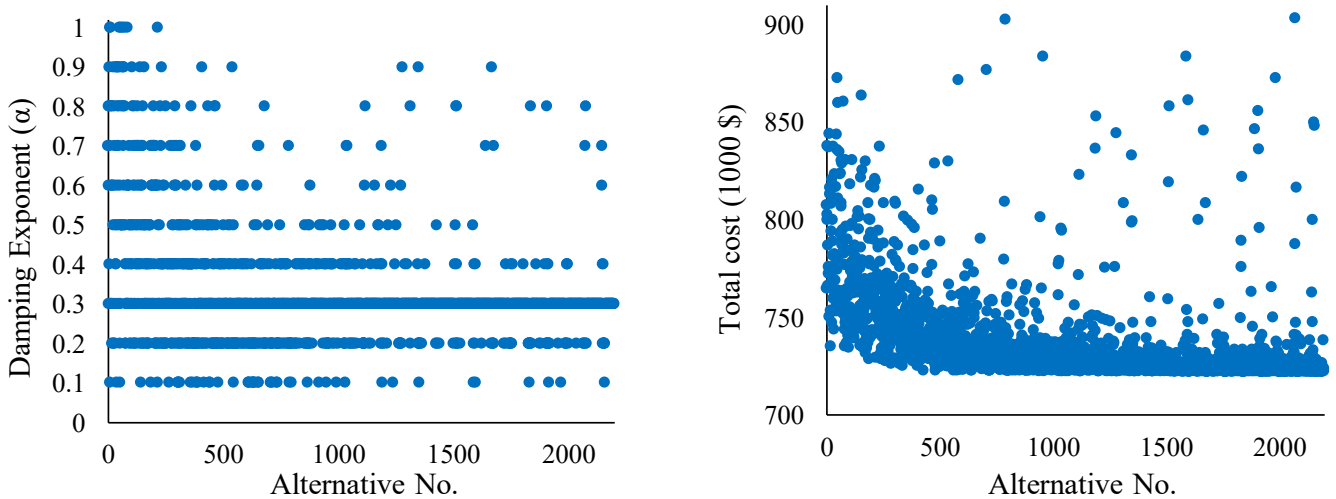


شکل ۸. ضرایب میرایی برای میراگرهای خطی در توزیع یکنواخت (UD) و متناسب با سختی (SPD) و جابجایی مستقیم (DBD) برای قاب الف (۳ طبقه ب) ۷ طبقه ج) ۱۵ طبقه

Fig. 8. Damping coefficients for linear dampers in UD, SPD and DBD designs for a) 3-story b) 7-story and c) 15-story frame

Tournament با اندازه ۴، نرخ جهش ۰/۱ به صورت یکنواخت، تعداد جمعیت نخبه در هر نسل ۲ و جابجایی با نسبت ۰/۸ به صورت تصادفی در نظر گرفته شده است و شرط خاتمه عدم تغییر در تابع برازش پس از ۱۰ نسل تعریف شده است. در شکل ۹ تغییرات هزینه کل در طی فرآیند بهینه سازی برای سازه ۷ طبقه با میراگرهای غیرخطی و همچنین تغییرات توان سرعت میرایی به عنوان نمونه نشان داده شده است. الگوریتم ژنتیک پس از حدود ۲۲۰۰ تحلیل تاریخچه زمانی ET، به سازه بهینه مورد نظر دست می یابد. همانطور

مسئله بهینه سازی تعریف شده در این تحقیق تابع هدف هزینه کل بوده و متغیرهای بهینه سازی متناظر با مقادیر میرایی در طبقات مختلف تعریف شده اند که مقداری بین ۰ تا ۲۵۰۰ کیلونیوتن به صورت گسسته با گام ۱۰۰ کیلونیوتن (۲۶ نیروی میرایی مختلف) می توانند اختیار کنند. همچنین برای حالت غیرخطی توان میرایی آلفا نیز به عنوان یک متغیر گسسته در بازه ۰/۱ تا ۱ با گام ۰/۱ (۱۰ توان مختلف) در نظر گرفته شده است. تعداد جمعیت اولیه در الگوریتم ژنتیک مورد استفاده ۱۰۰، برای عملگر انتخاب از روش



شکل ۹. هزینه کل و توان سرعت آلفا برای گزینه های طراحی میراگر ویسکوز غیرخطی در طی روند بهینه سازی برای سازه ۷ طبقه

Fig. 9. Total cost and damping exponent for design alternatives of nonlinear dampers for 7-story frame during optimization process

می‌باشد. البته لازم به ذکر است معیار تعیین توزیع بهینه میرایی در این پژوهش هزینه کل بوده و الزاماً پاسخ سازه‌ای کمتر منجر به هزینه کل کمتر نخواهد بود.

در شکل ۱۱ تا شکل ۱۳ به مقایسه‌ی ET Curve سازه‌های ۱۵ و ۷، ۳ طبقه پرداخته شده است. با استفاده از این منحنی‌ها عملکرد سازه‌ها با طرح‌های مختلف میراگر در سطوح خطر مختلف نسبت به سطوح مورد انتظار آیین‌نامه قابل بررسی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در مجموع میراگرهای بهینه غیرخطی بهترین عملکرد را داشته‌اند. البته همانطور که در ادامه مشاهده خواهد شد این طرح کمترین هزینه کل را نیز شامل خواهد شد.

۱۱- تحلیل هزینه

مؤلفه‌های هزینه دوره عمر و همچنین هزینه اولیه برای ۵ طرح مختلف میراگر در سازه‌های ۱۵ و ۷، ۳ طبقه در شکل ۱۴ تا شکل ۱۶ ارائه شده است. این طرح‌ها شامل ۳ طرح فرم بسته DBD، SPD، UD و ۲ طرح بهینه سازی شده میراگر ویسکوز در حالت

که ملاحظه می‌شود کمترین هزینه دوره عمر در توان سرعت ۰/۳ به دست آمده است. در بخش بررسی عملکرد خواهیم دید که این میرایی به بهترین عملکرد لرزه‌ای بر اساس پاسخ دررفت میان طبقه‌ای نیز منجر می‌شود. میرایی‌های بهینه برای هر کدام از حالت های خطی و غیرخطی سایر سازه‌ها در جدول ۷ تا جدول ۹ خلاصه شده است.

۱۰- عملکرد لرزه‌ای

در شکل ۱۰ به مقایسه عملکرد سازه بدون میراگر، طرح بهینه ی میراگر و میراگرهای به دست آمده تحت روش UD، SPD و DBD برای سازه ۱۵ و ۷، ۳ طبقه به ترتیب تحت رکوردهای حوزه نزدیک گسل بدون پالس، حوزه دور از گسل و تابع شتاب زمان دوام در سطح خطر ۴۷۵ سال پرداخته شده است. همانطور که ملاحظه میشود طرح بهینه میراگر ویسکوز بر اساس هزینه دوره عمر در حالت خطی و غیرخطی تحت هر کدام از سه دسته رکورد انتخابی باعث بهبود قابل توجهی در عملکرد قاب ۳ طبقه نسبت به سایر روش ها شده است. از طرفی با توجه به میرایی کل بالاتر در روش DBD، پاسخ‌های به دست آمده در این روش نیز عموماً کمتر از سایر روش‌های فرم بسته

جدول ۸. میراگرهای طراحی شده بر اساس ارزش برای سازه ۷ طبقه

Table 8. Cost-based design of dampers for 7-story frame

Story No.	Linear	NonLinear
	C (kN.m/s)	C (kN.m ^{0.3} /s ^{0.3})
Story 1	0	200
Story 2	750	500
Story 3	750	500
Story 4	750	550
Story 5	750	400
Story 6	950	500
Story 7	950	400

جدول ۷. میراگرهای طراحی شده بر اساس ارزش برای سازه ۳ طبقه

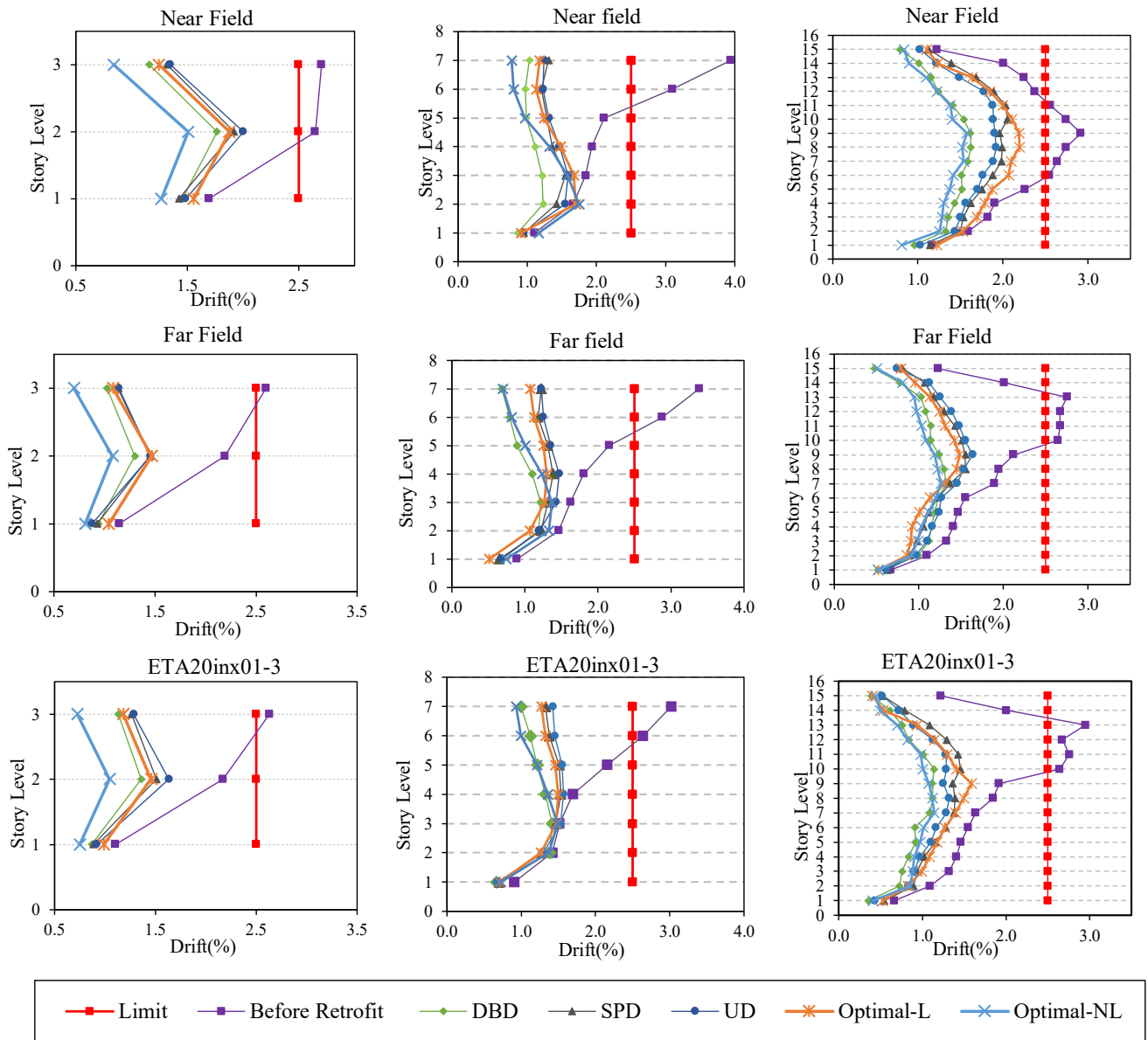
Table 7. Cost-based design of dampers for 3-story frame

Story No.	Linear	NonLinear
	C (kN.m/s)	C (kN.m ^{0.3} /s ^{0.3})
Story 1	800	700
Story 2	1200	700
Story 3	900	500

جدول ۹. میراگرهای طراحی شده بر اساس ارزش برای سازه ۱۵ طبقه

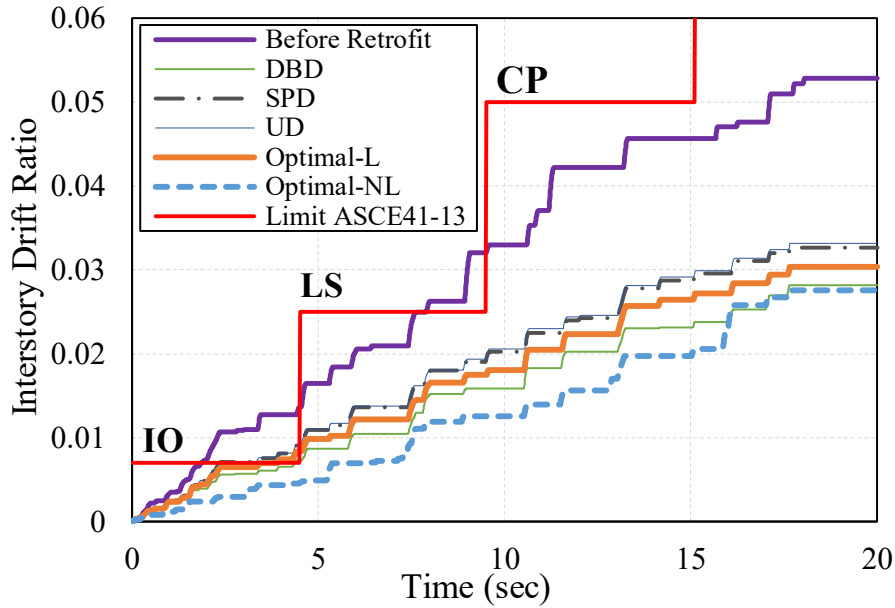
Table 9. Cost-based design of dampers for 15-story frame

Story No.	Linear	NonLinear
	C (kN.m/s)	C (kN.m ^{0.3} /s ^{0.3})
Story 1	250	400
Story 2	650	350
Story 3	550	500
Story 4	650	400
Story 5	0	400
Story 6	400	700
Story 7	0	400
Story 8	800	550
Story 9	700	450
Story 10	750	400
Story 11	750	550
Story 12	850	450
Story 13	850	350
Story 14	450	450
Story 15	550	50



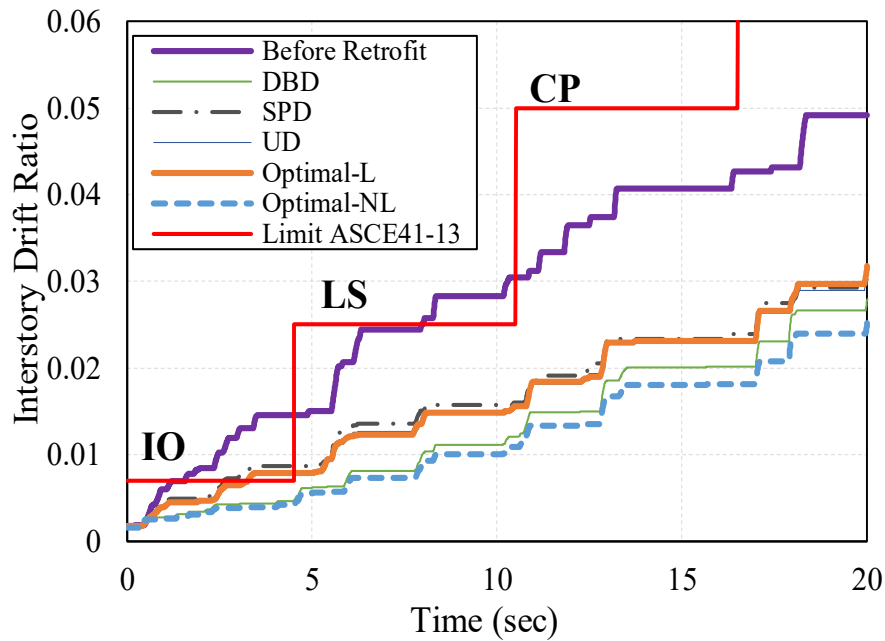
شکل ۱۰. بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها با طرح‌های مختلف میراگر و سازه بدون میراگر در سطح خطر ۴۷۵ تحت دوازده رکورد زلزله حوزه نزدیک کسل بدون پالس، حوزه دور از کسل و 3-ETA20inx01

Fig. 10. Seismic performance of structures with different damper designs at 475y hazard level under 12 no-pulse near-field and far-field and ETA20inx01-3



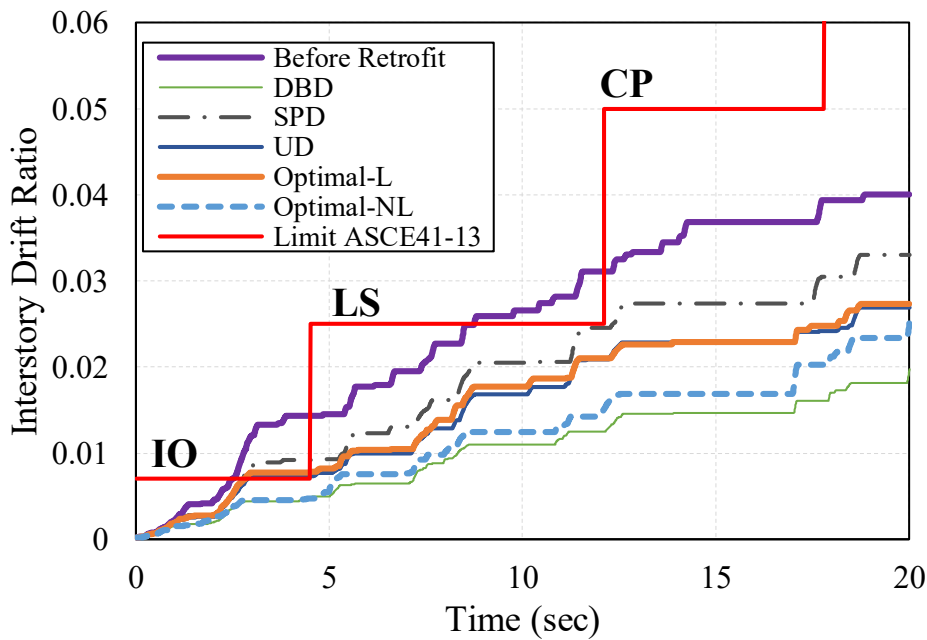
شکل ۱۱. مقایسه‌ی Curve ET برای سازه ۳ طبقه با طرح‌های مختلف میراگر و سازه بدون میراگر با حدود عملکردی آیین نامه 13-ASCE41

Fig. 11. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with outer diameter of 220 mm and wall thickness of 4.8 mm



شکل ۱۲. مقایسه‌ی Curve ET برای سازه ۷ طبقه با طرح‌های مختلف میراگر و سازه بدون میراگر با حدود عملکردی آیین نامه 13-ASCE41

Fig. 12. Comparison of cost components for different damper designs and without damper for one square meter in the 7 story structure



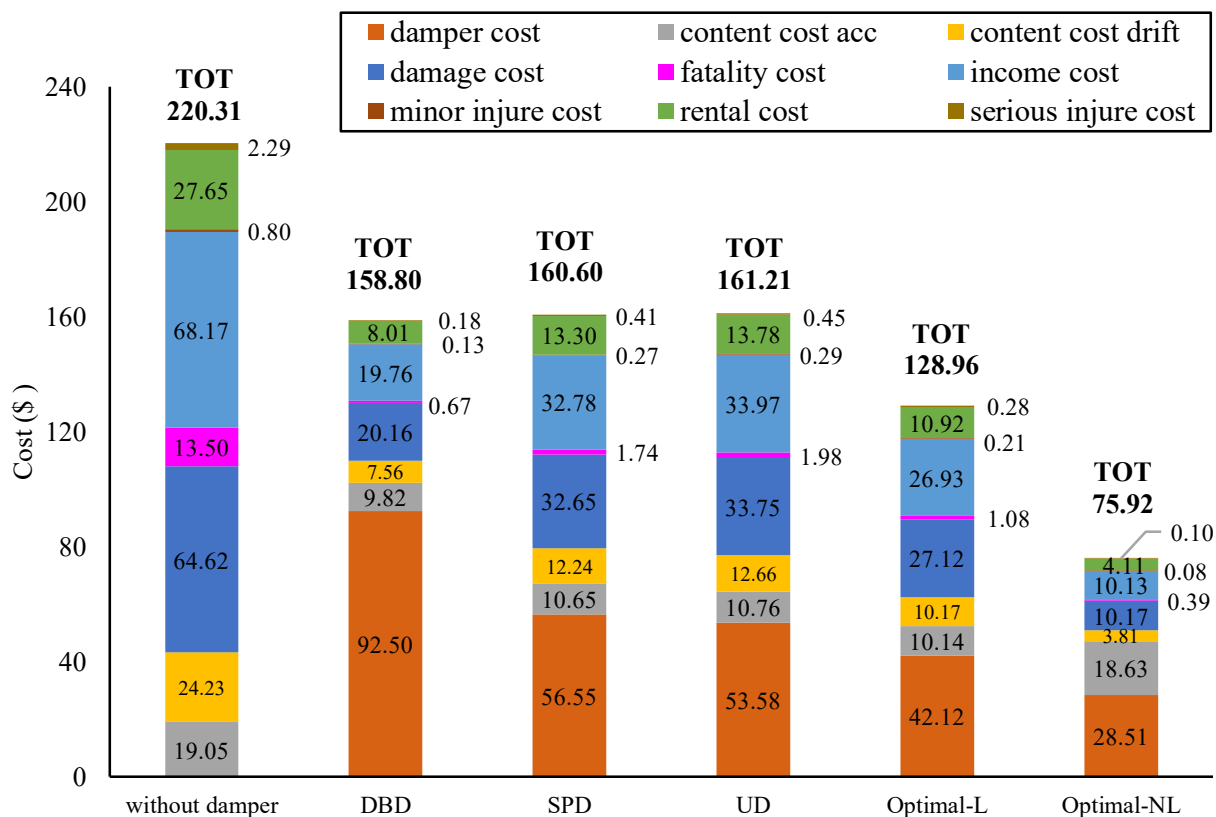
شکل ۱۳. مقایسه‌ی Curve ET برای سازه ۱۵ طبقه با طرح‌های مختلف میراگر و سازه بدون میراگر با حدود عملکردی آیین نامه ۱۳-ASCE41
Fig. 13. Comparison of ET Curve for 15-story structure with different damper designs with performance criteria of ASCE41-13

در روش DBD نسبت به طرح بهینه میراگر ویسکوز خطی کمتر است ولی دارای هزینه‌ی اولیه و هزینه کل بیشتری می‌باشد و از لحاظ اقتصادی مناسب نمی‌باشد. همچنین در سازه مجهز به میراگر ویسکوز بهینه خطی سایر مولفه‌های هزینه از جمله هزینه‌ی تعمیر خرابی سازه‌های، هزینه از دست رفتن درآمد ساختمان، هزینه جراحات وارده به ساکنین و هزینه تلفات جانی کمتر از سایر روش‌های طراحی میراگر ویسکوز می‌باشند. همچنین سازه مجهز به میراگر ویسکوز غیرخطی بهینه با مقدار آلفا بهینه $0/3$ نسبت به طرح بهینه خطی میراگر ویسکوز، دارای هزینه کل کمتر و هزینه دوره عمر کمتری می‌باشد و در آن تنها هزینه از دست رفتن محتویات ناشی از شتاب بیشتر از طرح بهینه خطی میراگر است. بیشتر بودن این مولفه‌ی هزینه در سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز غیرخطی بهینه به این علت است که در این میراگرها در سرعت‌های کمتر از 1 m/s مقاومت ماده ویسکوز درون میراگر در مقابل حرکت بیشتر از میراگر خطی بوده و باعث ایجاد نیروی بیشتری در میراگر می‌شود. در نتیجه در میراگرهای غیرخطی شتاب ایجاد شده و هزینه مورد انتظار در طبقات در شدت‌های تحریک پایین بیشتر از میراگر خطی خواهد بود.

در شکل ۱۷ کل روند طی شده در روش پیشنهادی به صورت یک

خطی و غیرخطی می‌باشد. در هرکدام از سازه‌ها مقدار هزینه اولیه ساخت سازه معادل ۶۰۰ دلار بر متر مربع برای کل مساحت زیربنای سازه در نظر گرفته شده است. در این شکل‌ها در بالای هر ستون مجموع سایر هزینه‌ها یعنی هزینه اولیه تجهیز سازه به میراگر و همچنین هزینه‌های دوره عمر به ازای یک متر مربع از مساحت سازه نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در بین این ۵ طرح انتخابی، طراحی سازه مجهز به میراگر ویسکوز بهینه خطی نسبت به روش‌های فرم بسته و سازه بدون میراگر دارای کمترین هزینه کل می‌باشد. همچنین سازه مجهز به میراگر ویسکوز غیرخطی با توان سرعت (آلفا) بهینه $0/3$ نیز کمترین هزینه کل را نسبت به سایر روش‌ها دارد.

همانطور که در شکل‌های بالا ملاحظه می‌گردد، در تمامی سازه‌های مجهز به میراگر، تمامی مولفه‌های هزینه کمتر از سازه بدون میراگر می‌باشند. در بین روش‌های خطی طراحی میراگر، سازه مجهز به میراگر ویسکوز خطی بهینه با دارا بودن کمترین هزینه کل، مقدار هزینه از دست رفتن محتویات ساختمان ناشی از شتاب و دریافت آن نسبت به روش UD و SPD کمتر است. اگرچه مقدار هزینه از دست رفتن محتویات ساختمان ناشی از شتاب و دریافت



شکل ۱۴. مقایسه‌ی مؤلفه‌های هزینه‌های طرح‌های مختلف میراگر و سازه بدون میراگر برای یک مترمربع در سازه ۳ طبقه

Fig. 14. Comparison cost components per square meter for 3-story structure with different damper designs

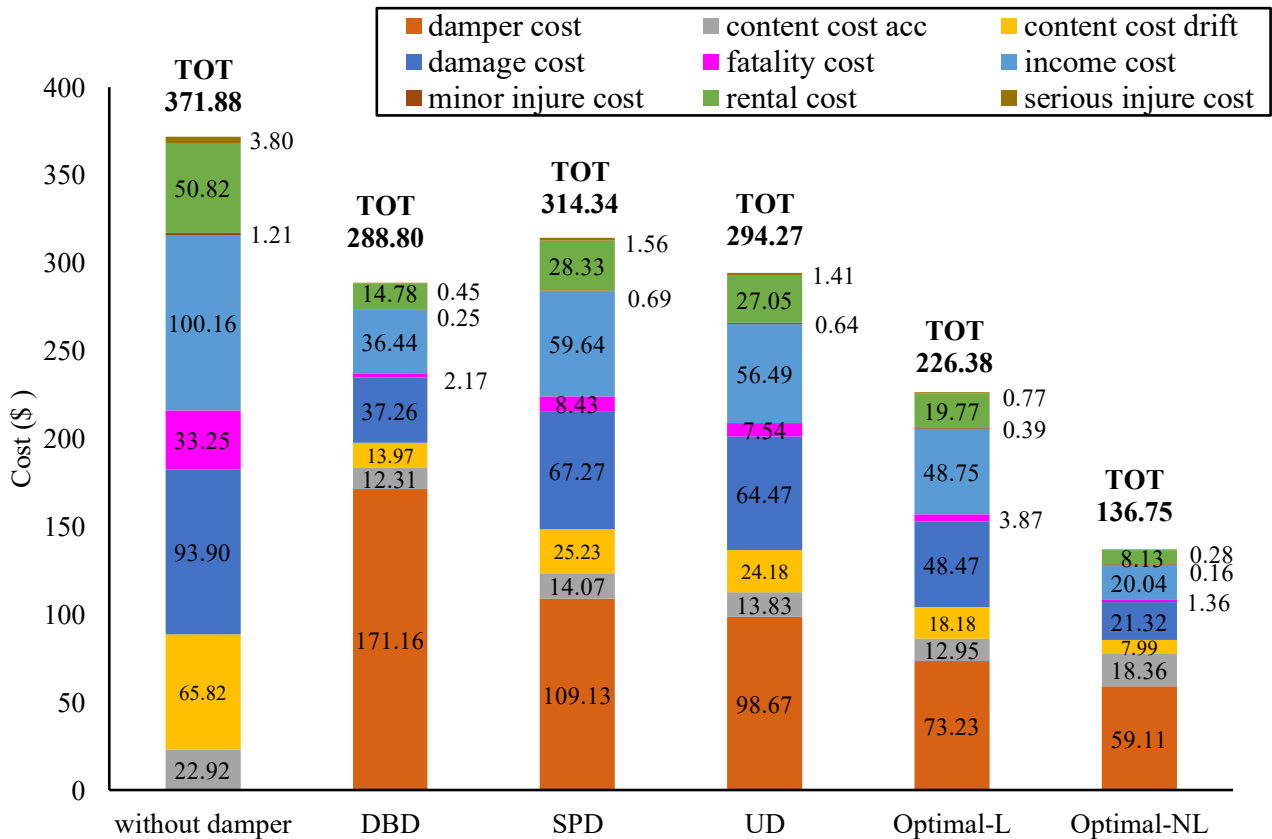
۱۲- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده در این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- یک الگوریتم طرح بهینه بر اساس هزینه کل برای سازه‌های دارای سیستم‌های کنترل غیرفعال ارائه گردید. در این روش از روش زمان دوام برای تخمین پاسخ‌های لرزه‌ای سازه در سطوح شدت مختلف و از یک چهارچوب قطعی برای تخمین هزینه دوره عمر سازه استفاده شده است.

۲- نشان داده شد که روش زمان دوام و منحنی ET به دست آمده ابزار مناسبی برای محاسبه‌ی قطعی هزینه‌ی خسارات فراهم می‌کند،

فلوچارت ارائه شده است. مرحله‌ی اول انتخاب سیستم کنترل لرزه‌ای می‌باشد. در مرحله‌ی دوم برای سیستم کنترل لرزه‌ای یک مدل هزینه توسعه داده می‌شود. در مرحله‌ی سوم پارامترهای مؤثر در عملکرد و روند طراحی سیستم انتخابی تعیین شده و بعد بازه‌ی تغییرات آن‌ها مشخص می‌شود. در مرحله‌ی بعد مسئله‌ی بهینه‌سازی تعریف شده و اهداف مشخص می‌شوند و از پارامترهای موثری که بر روی عملکرد سیستم مشخص شده‌اند به عنوان متغیرهای طراحی در الگوریتم ژنتیک تک هدفه استفاده می‌شود. در آخرین گام مسئله‌ی تعریف شده تحت یک الگوریتم تک هدفه بهینه‌سازی شده و سازه بهینه بر اساس ارزش کل سازه حاصل می‌گردد.



شکل ۱۵. مقایسه‌ی مؤلفه‌های هزینه‌های مختلف میراگر و سازه بدون میراگر برای یک مترمربع در سازه ۷ طبقه

Fig. 15. Comparison of cost components for different damper designs and without damper for one square meter in the 7 story structure

میراگرهای غیرخطی نسبت به حالت بهینه‌ی خطی، عملکرد بهتری در کاهش دریافت حداکثر طبقات دارند.

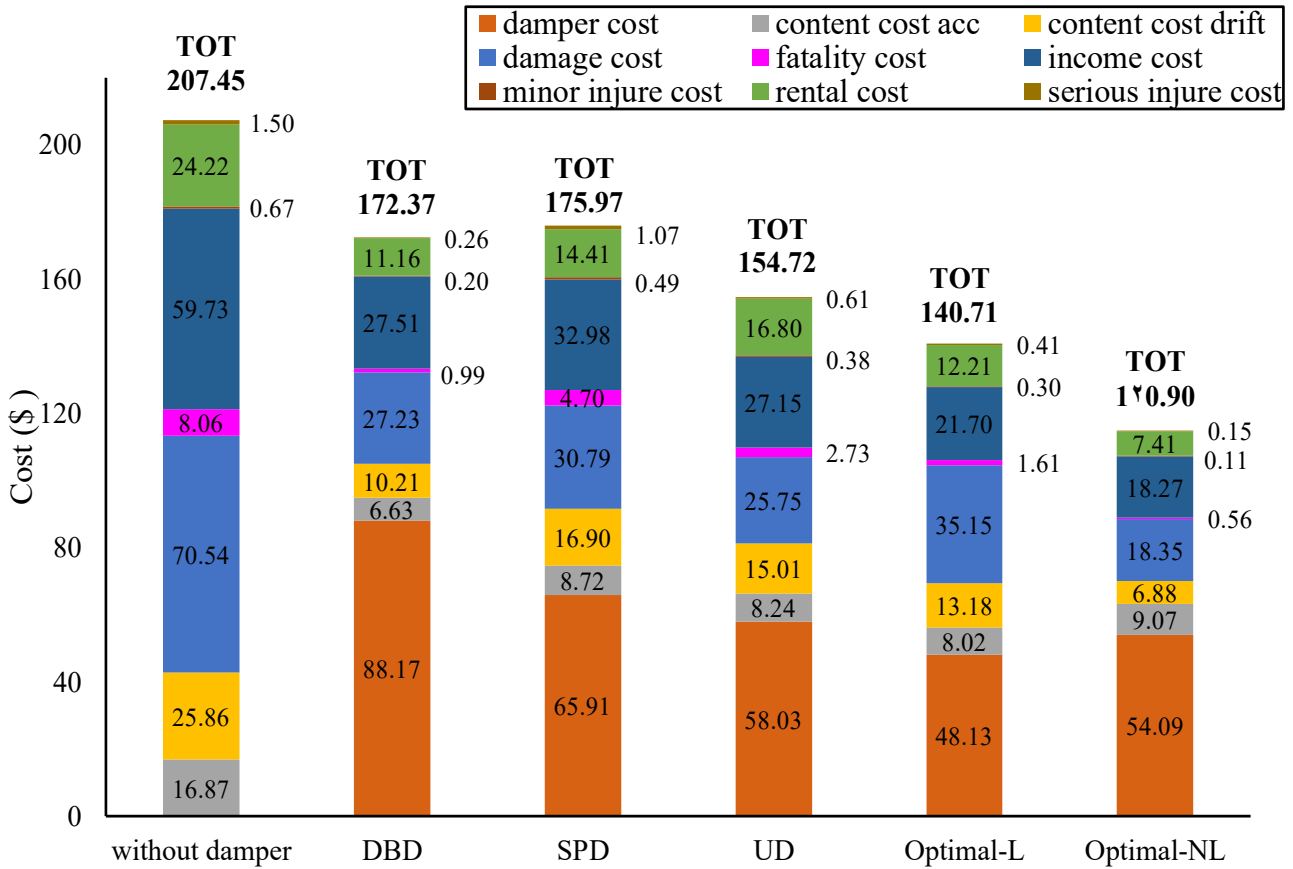
۵- رکوردهای زماندوام ETA20inx01-3، با توجه به نوع رکوردهای سازنده آن، تخمین دقیق‌تری از پاسخ سازه به رکوردهای زلزله حوزه دور از گسل ارائه می‌دهند، ولی تخمین‌هایی که برای زلزله‌های حوزه نزدیک بدون پالس به دست می‌دهند از دقت پایین‌تری برخوردار است. به ویژه، این امر با افزایش ارتفاع سازه تحت رکوردهای نزدیک گسل بدون پالس در قیاس با رکوردهای دور از گسل و زماندوام بارزتر می‌باشد.

۶- مقایسه‌ی هزینه‌های مورد انتظار در سازه‌های مجهز به میراگر

در حالی که حجم محاسبات لازم در سطح قابل قبولی برای استفاده در روش‌های بهینه‌سازی نگاه داشته می‌شود.

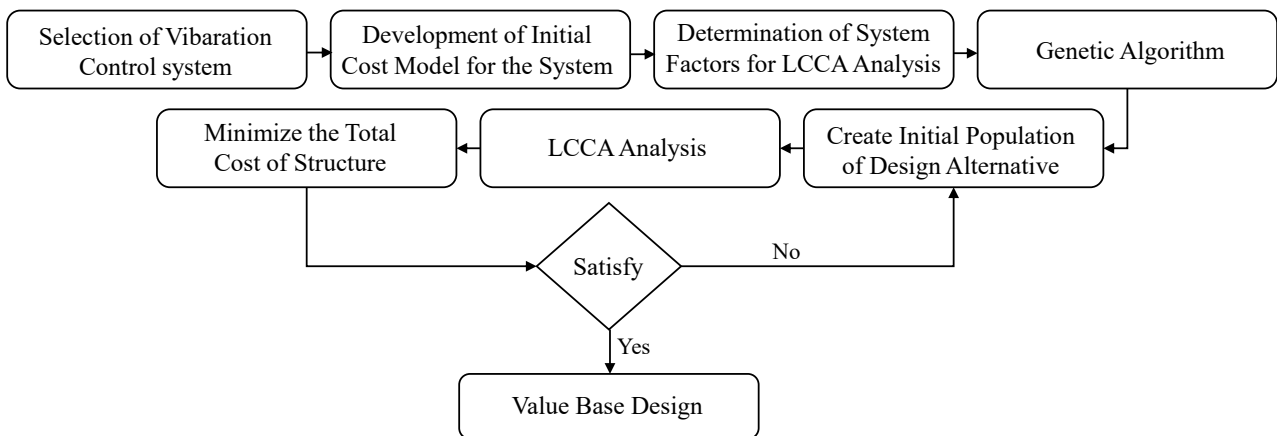
۳- چهارچوب ارائه شده برای تحلیل هزینه دوره عمر با استفاده از روش تحلیل زمان‌دوام این امکان را فراهم می‌کند که ملاحظات اقتصادی از یک ابزار ارزیابی نهایی به نقش تعیین‌کننده‌تری که مستقیماً اهداف طراحی را تعیین می‌کند ارتقاء یابد.

۴- با استفاده از تحلیل هزینه دوره عمر در سازه مجهز به میراگر ویسکوز غیرخطی، مقدار توان سرعت (آلفا) بهینه برابر با ۰/۳ به دست آمده است. بنابراین استفاده از این مقدار در طراحی و تولید میراگرهای ویسکوز پیشنهاد می‌شود. همینطور نشان داده شد که



شکل ۱۶. مقایسه‌ی مؤلفه‌های هزینه‌های مختلف میراگر و سازه بدون میراگر برای یک مترمربع در سازه ۱۵ طبقه

Fig. 16. Comparison cost components per square meter for 15-story structure with different damper designs



شکل ۱۷. فلوچارت طراحی بهینه بر اساس هزینه کل سازه برای سیستم‌های کنترل لرزه‌ای

Fig. 17. Flowchart of the proposed method for the cost-based optimum design of passive control systems

- [7] S. Silvestri, G. Gasparini, T. Trombetti, A five-step procedure for the dimensioning of viscous dampers to be inserted in building structures, 14(3) (2010) 417-447.
- [8] J. Whittle, M. Williams, T. Karavasilis, A. Blakeborough, A comparison of viscous damper placement methods for improving seismic building design, *Journal of Earthquake Engineering*, 16(4) (2012) 540-560.
- [9] J.S. Hwang, W.C. Lin, N.J. Wu, Comparison of distribution methods for viscous damping coefficients to buildings, *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(1) (2013) 28-41.
- [10] M. Bahmani, S.M. Zahrai, Application of a comprehensive seismic retrofit procedure for steel buildings using nonlinear viscous dampers, 17(8) (2019) 1261-1279.
- [11] M.C. Basim, H.E. Estekanchi, A. Vafai, A methodology for value based seismic design of structures by the endurance time method, *Scientia Iranica*, 23(6) (2016) 2514-2527.
- [12] H.E. Estekanchi, A. Vafaei, A.M. Sadeghazar, Endurance time method for seismic analysis and design of structures, *Scientia Iranica*, 11(4) (2004).
- [13] W.H. Lin, A.K. Chopra, Earthquake response of elastic SDF systems with non-linear fluid viscous dampers, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(9) (2002) 1623-1642.
- [14] C.E. Grigorian, T.S. Yang, Maximum damping forces for structures with viscous dampers under near-source earthquakes, 9(3) (2014) 491-504.
- [15] FEMA440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, Federal Emergency Management Agency Region II, (2005).
- [16] ASCE41-13, Seismic rehabilitation of existing buildings, American Society of Civil Engineers, Virginia, (2013).
- [17] M. Sánchez-Silva, R. Rackwitz, Socioeconomic implications of life quality index in design of optimum structures to withstand earthquakes, *Journal of Structural Engineering*, 130(6) (2004) 969-977.
- [18] H.E. Estekanchi, K. Arjmandi, Comparison of damage indexes in nonlinear time history analysis of steel ویسکوز خطی، غیرخطی و بدون میراگر برای سه طرح ۳ طبقه، ۷ طبقه و ۱۵ طبقه نشان داد که استفاده از سیستم‌های میراگر ویسکوز خطی در سازه سه طبقه تا ۶۵ درصد و میراگر ویسکوز غیرخطی تا ۸۰ درصد، در سازه هفت طبقه مجهز به میراگر ویسکوز خطی تا ۵۲ درصد و میراگر ویسکوز غیرخطی تا ۷۵ درصد و در سازه پانزده طبقه مجهز به میراگر ویسکوز خطی تا ۴۰ درصد و میراگر ویسکوز غیرخطی تا ۶۷ درصد سبب کاهش هزینه‌های دوره عمر سازه می‌شوند.
- ۷- بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها با طرح‌های مختلف میراگر تحت رکوردهای حوزه دور و حوزه نزدیک نشان داد که سازه‌های طراحی شده به روش پیشنهادی (بر اساس هزینه کل) علاوه بر هزینه کل کمتر، عملکرد لرزه‌ای بهتری نیز دارند.

مراجع

- [1] H.E. Estekanchi, M.C. Basim, Optimal damper placement in steel frames by the Endurance Time method, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(5) (2011) 612-630.
- [2] C.Y. Seo, T.L. Karavasilis, J.M. Ricles, R. Sause, Seismic performance and probabilistic collapse resistance assessment of steel moment resisting frames with fluid viscous dampers, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(14) (2014) 2135-2154.
- [3] D. Altieri, E. Tubaldi, E. Patelli, A. Dall'Asta, Assessment of optimal design methods of viscous damper, *X International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN*, (2017).
- [4] Y.-K. Wen, Y. Kang, Minimum building life-cycle cost design criteria. I: Methodology, *Journal of Structural Engineering*, 127(3) (2001) 330-337.
- [5] Y. Takahashi, A.D. Kiureghian, A.H.S. Ang, Life-cycle cost analysis based on a renewal model of earthquake occurrences, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 33(7) (2004) 859-880.
- [6] A.J. Kappos, E. Dimitrakopoulos, Feasibility of pre-earthquake strengthening of buildings based on cost-benefit and life-cycle cost analysis, with the aid of fragility curves, *Natural Hazards*, 45(1) (2008) 33-54.

- Chicago-Illinois, (2010).
- [26] ASCE7-10, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, (2010).
- [27] A.S. Whittaker, M.C. Constantinou, P. Tsopelas, Y. Kim, S. Okamoto, Equivalent Lateral Force and Modal Analysis Procedures of the 2000 NEHRP Provisions for Buildings with Damping Systems, (2003).
- [28] T. Trombetti, S. Silvestri, On the modal damping ratios of shear-type structures equipped with Rayleigh damping systems, Journal of sound and vibration, 292(1-2) (2006) 21-58.
- [29] K.-S. Lee, J. Ricles, R. Sause, Performance-based seismic design of steel MRFs with elastomeric dampers, Journal of structural engineering, 135(5) (2009) 489-498.
- [30] T.L. Karavasilis, R. Sause, J.M. Ricles, Seismic design and evaluation of steel moment-resisting frames with compressed elastomer dampers, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 41(3) (2012) 411-429.
- [31] R. Gobirahavan, A. Wijeyewickrema, An Alternative Design Method for the Seismic Retrofit of RC Moment Resisting Frame Buildings with Viscous Dampers, Journal of Earthquake Engineering, (2019) 1-31.
- moment frames, Asian Journal of Civil Engineering, 7(6) (2007) 629-646.
- [19] ATC-13, Earthquake damage evaluation data for California, Applied technology council, 1985.
- [20] A. Elenas, K. Meskouris, Correlation study between seismic acceleration parameters and damage indices of structures, Engineering Structures, 23(6) (2001) 698-704.
- [21] FEMA-227, A Benefit-Cost Model for the Seismic Rehabilitation of Building, Federal Emergency Management Agency, Building Seismic Safety Council Washington DC, (1992).
- [22] Y. Wen, Y. Kang, Minimum building life-cycle cost design criteria. II: Applications, Journal of Structural Engineering, 127(3) (2001) 338-346.
- [23] N.D. Lagaros, Life-cycle cost analysis of design practices for RC framed structures, Bulletin of Earthquake Engineering, 5(3) (2007) 425-442.
- [24] C.C. Mitropoulou, Advanced computational methods for seismic design and assessment of reinforced concrete structures, in, Athènes: PhD Dissertation, Institute of Structural Analysis and Antiseismic, (2011).
- [25] ANSI/AISC 360-10, Specification for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Ahadzadeh kolour, M. Charkhtab Basim, M.R. Chenaghlou, *Optimal Design and Performance Assessment of Viscous Dampers in Steel Frames Based on Life Cycle Cost*, Amirkabir J. Civil Eng., 53 (6) (2021) 2389-2414.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17403.6551

