


Studying the Effect of Weighting Factors of the Objective Function on the Performance of the Genetic Algorithm in Active Control of Structures

Research Article

Ali Banaei¹, Javad Alamatian² , Reza Zia Tohidi³DOI: [10.22067/jfcei.2023.77364.1159](https://doi.org/10.22067/jfcei.2023.77364.1159)

1. Introduction

The idea of using active control for monitoring structural oscillation was first introduced in 1972. Active control methods try to reduce the amplitudes of oscillations by having more influence on the dynamic characteristics of structure when an external dynamic force occurs. In the structural active control method, it is necessary for the control system to pick up the status of displacements in the defined time steps. This issue is important because the genetic algorithm by monitoring these displacements is able to calculate the optimal active control forces for each time step of the structure control process. For this purpose, piezoelectric sensors are connected in all floors of the structure. In this research, the genetic algorithm was used to prepare suitable control forces.

The early development of genetic algorithm was done by John Holland et al. at the University of Michigan in 1962. Moreover, the implications of genetic algorithm were developed by Goldberg in 1989. Safizadeh et al. conducted a research to find the suitable location of the sensor in active and passive systems, using developed optimization method and genetic algorithm at the same time. In 2016, Zhai et al. conducted a research to optimize the characteristics of piezoelectric actuators connected to the structure, using genetic algorithm. Moreover, in 2018, a research was conducted in the state space to find the appropriate location of sensors and dynamic actuators in the structure, so that the energy required by the control system is minimized. In 2020, Banaei and Alamatian proposed a new application of genetic algorithms in active control procedure. The genetic algorithm is founded based on trial and error and, accordingly, the effect of time delay was considered during the control process. Also, this method was performed using the new constrained objective function and the direct numerical search method was designed for evaluating and reducing time delay in control process, which make it possible to use in real control systems. In this research, by introducing a new process, the weighting factors of the constrained objective function are modified in

each time step. To do this, first, the displacements of the structure in each time step are obtained by solving the dynamic equilibrium equation. Then, by evaluating the displacements and using the numerical search subprogram, the weighting factors of the constrained objective function are calculated in such a way that the function is minimized in that step. After that, the control forces obtained from the minimization of the constrained objective function are determined. In the end, by solving some numerical examples, the efficiency of the proposed method is compared with the efficiency of other methods. The results of linear modeling show that the use of the proposed active control method using the genetic algorithm with variable weighting factors is able to reduce the displacements of the structure against the earthquake load to a suitable extent. The displacement reduction using this method is about 79% compared to the uncontrolled mode and about 36% in the linear mode compared to the genetic algorithm method with constant weighting factors. Moreover, the results of nonlinear structure show an average improvement of 45%.

Keywords: Active Control, Genetic Algorithm, Numerical Analysis, Weighting Factors

2. Basics of the proposed control algorithm

The goal of the genetic algorithm is to find control forces in such a way that the displacement of the structure is minimized. As a result, the objective function is formed to indicate the displacement of all dynamic degrees of freedom of the structure. As the numerical value of this function is reduced, the forces selected by the search algorithm are evaluated more appropriately. In this research, the constrained objective function is introduced as follows:

$$\text{COF} = \sum_{i=1}^q |x_i| \cdot \left[1 + w_1 \sqrt{(x_i - \bar{x})^2} + w_2 \frac{1}{|X_i - x_i|} + w_3 \left(\max \left\{ \frac{|x_i|}{\Delta x} - 1, 0 \right\} \right) + w_4 \frac{x_{i+1} - x_i}{h_i} \right] \quad (1)$$

*Manuscript received June 26, 2022, Revised, August 28, 2023, Accepted, November 12, 2023.

¹. PhD in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran.

². Corresponding author. Associate Professor in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran. Email: alamatian@mshdiau.ac.ir

³. Assistant Professor in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

The value of the weighting factors of the objective function is determined by the following equation system and by simplex optimization method in each step:

$$\bar{C} = \sum_{k=1}^m |w_k c_k| \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^m |w_k| = 1 \quad (3)$$

$$0 \leq w_k \leq 1 \quad (4)$$

After determining the optimal weighting factors, the algorithm searches for control forces by keeping them constant in each time step.

3. Results

To illustrate the effectiveness of the proposed method for controlling the oscillations of the structure, several numerical examples were solved. The results are presented as follows.

Table 1. The maximum displacement and force of Actuators in a seven-story structure under the effect of the Northridge earthquake load pattern

Dynamic degree of freedom	maximum displacement on no control state (cm)	maximum displacement on GA control state (cm)	Actuator force (Kg . Force)
1	4.05	1.61	16.64
2	7.78	2.71	14.31
3	11.48	3.64	19.74
4	15.08	4.22	16.87
5	18.71	4.56	18.41
6	21.38	5.84	19.74
7	23.46	6.03	21.09

Table 2. The maximum displacement and force of actuators in a twelve-story structure under the effect of the Kobe earthquake load pattern

Dynamic degree of freedom	maximum displacement on no control state (cm)	maximum displacement on GA control state (cm)	Actuator force (Kg . Force)
1	1.13	0.58	9.11
2	2.21	0.62	9.03
5	5.03	0.72	6.84
6	6.27	0.84	8.17
10	8.96	0.84	6.14
11	12.23	0.82	6.12
12	12.81	0.84	6.03

Table 3. Comparison of the maximum displacements of three-story structure under the effect of the Northridge earthquake load pattern in the linear and nonlinear model

Dynamic degree of freedom	maximum displacement on no control state (cm)	maximum displacement on linear GA control state (cm)	maximum displacement on nonlinear GA control state (cm)
1	1.24	1.84	0.79
2	3.64	3.66	2.16
3	4.45	4.92	2.52

4. Discussion

The effectiveness of the proposed method in the active control of the structure was shown. In this regard, the appropriate criteria for defining the constrained objective function were presented. Simplex optimization method was used to find the optimal weighting factors. By using the direct numerical search method, the displacement of the structure was determined using the dynamic equation of the structure and evaluating the data with the criterion of the constrained objective function. The control forces reduced the displacement of the structure. The innovations of this research are as follows:

- 1) Presenting a new proposed objective function with four weighting coefficients;
- 2) Presenting the proposed method using simplex optimization method to determine the most appropriate weighting factors in the constrained objective function instead of using trial-and-error-based methods;
- 3) Considering the weighting factors of the objective function as variables instead of assuming them to be constant during the active control process, which increased the efficiency of the new method.



بررسی تأثیر ضرایب وزنی تابع هدف بر کارایی الگوریتم ژنتیک در کنترل فعال سازه‌ها*

مقاله پژوهشی

علی بنائی^(۱) جواد علامتیان^(۲) رضا ضیاء توحیدی^(۳)

DOI: 10.22067/jfpei.2023.77364.1159

چکیده در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های جستجوی عددی هوشمند در کنترل فعال سازه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. الگوریتم ژنتیک یکی از این شیوه‌ها است که بر پایه الگوهای فرگشت طبیعی می‌باشد. در اینجا، از الگوریتم ژنتیک برای کمینه کردن تابع هدف مقید سازه و تعیین نیروهای کنترلی مناسب استفاده می‌گردد. با متصل کردن حسگر به درجه‌های آزادی سازه، مقدار جابه‌جایی گره‌ها در هر گام زمانی پایش می‌شوند و الگوریتم ژنتیک با بهره‌گیری از تابع هدف مقید و حل معادله دینامیکی سازه، مقدار نیروهای کنترلی مناسب را تعیین می‌کند. انتخاب تابع هدف مقید متناسب با شرایط سازه، اثر زیادی بر کارایی کنترل فعال دارد. این تابع از ترکیب محدودیت‌های سازه و ضرایب وزنی پنداشته شده برای هر محدودیت، به دست می‌آید. سپس، ضرایب وزنی از شیوه‌های بهینه‌سازی محاسبه می‌شوند. چنین فرایندی به یک شیوه نوین برای کنترل فعال با استفاده از الگوریتم ژنتیک منجر می‌شود. کارایی و دقت الگوریتم پیشنهادی با کنترل نوسان‌های چندین سازه بررسی می‌گردد. نتایج حاصل از مدل‌سازی خطی نشان می‌دهند استفاده از روش کنترل فعال پیشنهادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک با ضرایب وزنی متغیر قادر است تا جابه‌جایی‌های سازه را در مقابل بار زلزله به میزان مناسبی کاهش دهد. جابه‌جایی‌های سازه با استفاده از این شیوه نسبت به حالت بدون کنترل حدود ۷۹ درصد و نسبت به روش الگوریتم ژنتیک با ضرایب وزنی ثابت حدود ۳۶ درصد در حالت خطی کاهش دارد. همچنین نتایج در مدل‌سازی غیرخطی سازه، بهبودی را به میزان ۴۵ درصد به صورت میانگین نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی الگوریتم ژنتیک، تحلیل عددی، ضرایب وزنی، کنترل فعال.

Studying the Effect of Weighting Factors of the Objective Function on the Performance of the Genetic Algorithm in Active Control of Structures

Ali Banaei Javad Alamatian Reza zia Tohidi

Abstract In recent years, the use of smart numerical search techniques in active control of structure has been considered by researchers. Genetic algorithm is one of these methods that is based on natural evolution patterns. Here, the genetic algorithm is used to minimize the constrained objective function of the structure and determine the appropriate control forces. By connecting the sensor to the degrees of freedom of the structure, nodal displacement is monitored at each time step and genetic algorithm determines the proper control forces by using constrained objective function and solving dynamic equation of the structure. Choosing appropriate constrained objective function according to the structure conditions has a great impact on the efficiency of the proposed method. This function is obtained by combining the structural constraints and the assumed weighting factors for each constraint. Then, the weighting factors are calculated from the optimization methods. Such a process, leads to achieve a new active control method based on using genetic algorithm. The efficiency and accuracy of the proposed algorithm are investigate by controlling the oscillations of several structures. The results show that the proposed method is able to reduce structural oscillations effectively. The results of the linear modeling show that the use of the proposed active control method is able to reduce the displacements of the structure against the earthquake properly. By using this method, the displacement reduction is about 79% compared to the uncontrolled mode and 36% in the linear mode compared to the genetic algorithm method with constant weighting factors. In addition, the results in nonlinear modeling of the structure show an average improvement of 45%.

Key Words Active Control, Genetic Algorithm, Numerical Analysis, Weighting Factors.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۴/۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۸/۲۰ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری عمران-سازه، گروه عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار گروه عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

(۳) استادیار گروه عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

مقدمه

استفاده از شیوه‌های کنترل فعال در سازه‌ها، نخستین بار در سال ۱۹۷۲ مطرح گردید. این شیوه‌ها نسبت به کنترل غیر فعال با تأثیرگذاری بیشتر بر مشخصات دینامیکی سازه در زمان وارد آمدن نیروی جانبی خارجی نظیر زلزله، سعی بر کاهش دامنه‌های نوسان دارند [1]. در شیوه کنترل فعال سازه لازم است تا سامانه کنترلی در بازه زمانی تعریف شده، وضعیت جابه‌جایی طبقات را برداشت کند. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که الگوریتم ژنتیک با پایش این جابه‌جایی‌ها قادر است تا نیروهای کنترل فعال بهینه را برای هر گام زمانی از فرایند کنترل سازه محاسبه نماید. جهت این کار حسگرهای پیزوالکتریک در کلیه طبقات سازه متصل می‌شوند. حسگرهای پیزوالکتریک ابزاری هستند که با استفاده از ویژگی‌های مولکولی - الکتریکی خود، شتاب حرکت را تعیین می‌کنند. در این حسگرها، متناسب با تنش ایجاد شده در ساختار میکروسکوپی بلوره‌ها ناشی از نیروهای اینرسی، ولتاژی تولید می‌شود که مبنایی برای اندازه‌گیری شتاب است. همچنین، با متصل کردن عملگرهای دینامیکی به درجه‌های آزادی سازه، نیروهای کنترلی مناسب برای کاهش جابه‌جایی ناشی از تحریک خارجی، تولید و اعمال می‌گردد [2]. پس از آن، به‌کارگیری روش‌های کنترلی فعال توسط پژوهشگران توسعه پیدا کرد [3,4]. کارایی شیوه کنترل فعال به انتخاب مناسب نیروهای کنترلی در هر گام زمانی وابسته است. بنابراین، باید وضعیت جابه‌جایی سازه در هر گام، به طور مناسب کنترل گردد. همچنین لازم است، با بهره‌گیری از یک الگوریتم جستجوی توانمند، مقدار مناسب نیروهای کنترلی تعیین گردند. روش‌های عددی به دلیل عدم وابستگی به محدودیت‌های گرادیان مشتق‌های بهینه‌سازی و سرعت بالای این روش‌ها در مقایسه با شیوه‌های تحلیلی، در کنترل فعال سازه‌ها بسیار کاربرد یافته‌اند [5]. روش‌های جستجوی عددی هوشمند، گروهی از شیوه‌های عددی مبتنی بر الگوهای تکامل طبیعی هستند که کاربردهای زیادی در مهندسی دارند. در این پژوهش، الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یکی از روش‌های پایه استفاده شده است.

نخستین پیشرفت‌ها در استفاده از الگوریتم ژنتیک توسط جان هالند و همکارانش در دانشگاه میشیگان ایالات متحده در سال ۱۹۶۲ انجام شد [6]. مفاهیم الگوریتم ژنتیک در سال ۱۹۸۹ توسط گلدبرگ توسعه داده شد [7]. صفی‌زاده و همکاران پژوهش‌هایی برای یافتن محل مناسب حسگر در سامانه‌های

فعال و غیر فعال، با استفاده هم‌زمان از شیوه بهینه‌سازی توسعه‌یافته و الگوریتم ژنتیک، انجام دادند [8]. در سال ۲۰۱۲، یانگ و همکارانش از الگوریتم چندهدفه برای یافتن محل مناسب حسگرهای دینامیکی در سامانه کنترلی استفاده کردند [9-11]. هیل و درجی با استفاده از این شیوه توانستند محل مناسب حسگر و عملگر را برای کمینه‌سازی نوسان‌های یک ورق طره تعیین کنند [11]. همچنین در سال ۲۰۱۸، پژوهش‌هایی در فضای حالت برای یافتن محل مناسب حسگرها و عملگرهای دینامیکی در سازه صورت گرفت، به‌طوری‌که انرژی مورد نیاز سامانه کنترلی حداقل گردد [12,13]. در سال ۲۰۲۱ بنائی و علامتیان، شیوه‌ای نوین در کنترل فعال سازه‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک اصلاح شده ارائه دادند. در این شیوه از تابع هدف مقید اصلاح شده و فرایند جستجوی عددی مستقیم برای در نظر گرفتن اثر تأخیر زمانی استفاده شد. تابع هدف، با ترکیب محدودیت‌های سازه‌ای و استفاده از ضرایب وزنی به‌صورت ثابت، تولید و در فرایند کنترل استفاده گردید [14].

در پژوهش پیش رو، با معرفی فرایندی نوین، ضرایب وزنی تابع هدف مقید در هر گام زمانی اصلاح می‌شود. برای انجام این کار، نخست جابه‌جایی‌های گرهی سازه در هر گام زمانی با حل معادله تعادل دینامیکی به دست می‌آیند. سپس، با ارزیابی جابه‌جایی‌ها و استفاده از زیربرنامه جستجوی عددی، ضرایب وزنی تابع هدف مقید به‌گونه‌ای محاسبه می‌شوند که تابع هدف در آن گام، کمینه گردد. پس از آن، نیروهای کنترلی به دست آمده از کمینه‌سازی تابع هدف مقید تعیین می‌شوند. در پایان، با حل چند نمونه عددی، کارایی شیوه پیشنهادی با دیگر روش‌ها مقایسه می‌گردد.

مفاهیم کلی روش پیشنهادی

هدف اصلی سامانه کنترل فعال، یافتن مناسب‌ترین نیروهای کنترلی در هر لحظه برای کاهش جابه‌جایی سازه است. هر چه الگوریتم جستجو، نیروهای کنترلی مناسب‌تری را بیابد، کارایی این شیوه افزایش می‌یابد. الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک روش جستجوی هوشمند در فرایند کنترل پیشنهادی، مورد استفاده قرار خواهد گرفت. این الگوریتم، یک شیوه جستجوی عددی فرگشتی است که با پایش جابه‌جایی‌های سازه در هر گام

دینامیکی سازه فراهم گردد. در نتیجه، الگوریتم جستجو، تابع هدف مقید ارائه شده در رابطه (۵) را کمینه کرد.

$$COF = \sum_{i=1}^q |x_i| \cdot \left[1 + w_1 \sqrt{(x_i - \bar{x})^2} + w_3 \left(\max \left\{ \frac{|x_i|}{\Delta x} - 1, 0 \right\} \right) + w_2 \frac{1}{|X_i - x_i|} \right] \quad (5)$$

در این پژوهش برای افزایش دقت و کارایی الگوریتم ژنتیک، معیار دریفت طبقات نیز به صورت زیر تعیین می شود:

$$F = \sum_{i=1}^q \frac{x_{i+1} - x_i}{h_i} \quad (6)$$

در رابطه (۶) h_i ارتفاع طبقه i ام سازه است. گفتنی است، معیارهای ارائه شده توسط نویسندگان به صورت تجربی و حل نمونه های عددی گوناگون، پیشنهاد گردیده است. در نتیجه، می توان تابع هدف مقید پیشنهادی را به صورت زیر ارائه داد:

$$COF = \sum_{i=1}^q |x_i| \cdot \left[1 + w_1 \sqrt{(x_i - \bar{x})^2} + w_2 \frac{1}{|X_i - x_i|} + w_3 \left(\max \left\{ \frac{|x_i|}{\Delta x} - 1, 0 \right\} \right) + w_4 \frac{x_{i+1} - x_i}{h_i} \right] \quad (7)$$

در این پژوهش از رابطه (۷) برای برازش و صلاحیت سنجی عضوهای جستجو شونده در فرایند کنترل فعال با استفاده از روش نوین پیشنهادی، استفاده می شود. در این رابطه مقادارهای w_1 تا w_4 ضرایب های وزنی هستند که با توجه به میزان اهمیت هر عامل تعیین می گردند. در این پژوهش برای سرهم بندی تابع هدف مقید از شیوه جمع شونده با چهار ضریب وزنی استفاده شد ولی امکان استفاده از سایر اعمال جبری نیز میسر است. برای نمونه می توان با در نظرگیری شاخص جرم و سرعت طبقات و ترکیب آنها به صورت ضرب شونده به عنوان شاخصی از انرژی سازه، تابع های هدف مقید دیگری را تولید و مورد ارزیابی قرار داد. باید دانست، یکی از نوآوری های این پژوهش، معرفی تابع هدف (هزینه) با ضرایب وزنی متغیر است.

ضرایب وزنی تابع هدف مقید

در رابطه (۷) با استفاده از قیدهای مسئله، تابع هدف مقید به دست آمد. افزون بر اهمیت قیدهای انتخابی، نحوه ترکیب این قیدها و تعیین میزان اثر هر قید نیز دارای اهمیت است. ضرایب وزنی برای در نظر گرفتن اهمیت نسبی هر قید در تابع هدف

زمانی، به جستجوی مقدارهای بهینه نیروهای کنترلی می پردازد. پایداری روش الگوریتم ژنتیک وابستگی زیادی به تابع هدف مقید مورد استفاده دارد. در این زمینه، انتخاب مناسب قیدها در تابع هدف مقید با توجه به شرایط سازه، منجر به افزایش کارایی الگوریتم در کنترل فعال می گردد. هرچه تابع هدف مقید به کار گرفته شده انطباق بیشتری با محدودیت های سازه داشته باشد، الگوریتم کنترل، رفتار سازه را با دقت بیشتری ارزیابی می کند. انتخاب قیدها باید به گونه ای باشد تا الگوریتم جستجو را به سمت فضای جستجوی پاسخ های ممکن هدایت کند.

تابع هدف پیشنهادی

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه سازی مبتنی بر کمینه سازی تابع هدف است. تابع هدف باید به گونه ای انتخاب شود که معرف عملکرد مورد انتظار از سامانه مورد مطالعه باشد. هدف از پژوهش پیش رو، توسعه الگوریتم ژنتیک معرفی شده توسط نویسندگان در مرجع [14] در کنترل فعال سازه است. در مرجع [14] تابع هدف برای سازه q درجه آزادی، به صورت زیر تعریف شد:

$$C = \sum_{i=1}^q \sqrt{x_i^2} \quad (1)$$

در الگوریتم ژنتیک، لازم است محدودیت های مسئله در روند جستجوی مقدار بهینه، مورد توجه قرار گیرند. توجه به این قیدها (محدودیت ها) و ترکیب آنها به صورت مناسب در تابع هدف موجب افزایش کارایی و بهبود عملکرد الگوریتم در جستجوی پاسخ های پذیرفتنی در فضای مسئله می شود. در ادامه قیدهای معرفی شده در مرجع ذکر شده به صورت زیر معرفی شد [14]:

$$1 \text{ معیار} = \sqrt{\sum_{i=1}^q (x_i - \bar{x})^2}, \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^q (x_i)}{q} \quad (2)$$

$$2 \text{ معیار} = \sum_{i=1}^q \left(\max \left\{ \frac{|x_i|}{\Delta x} - 1, 0 \right\} \right) \quad (3)$$

$$3 \text{ معیار} = \sum_{i=1}^q \frac{1}{|X_i - x_i|} \quad (4)$$

با افزودن تابع جریمه به تابع هدف، تابع هدف مقید به گونه ای حاصل شد که امکان بهره گیری از فرایند جستجوی مستقیم عددی برای یافتن نیروهای کنترلی، با استفاده از معادله تعادل

جابه‌جایی تخصیص می‌یابد و یک زوج داده همبسته می‌سازد. پس از آن، با استفاده از تابع هدف مقید، زوج داده‌ها برازش می‌شوند و مناسب‌ترین پاسخ به‌عنوان نیروی کنترلی آن گام به کار می‌رود. پس از آن، الگوریتم به گام زمانی بعدی می‌رود. برای مشخص شدن ابعاد جمعیت و تعداد عضوهای تولید شده در هر گام، لازم است متغیرهای مربوط به عملگرهای ژنتیکی تعیین گردند. پژوهش‌های گوناگونی در زمینه تعیین ابعاد جمعیت نخستین، ضرایب اعمال جهش و برازش داده‌ها با توجه به نوع مسئله انجام شده است [18,19].

مراحل الگوریتم نوین در کنترل فعال سازه

هسته الگوریتم ژنتیک استفاده شده در این پژوهش همانند دیگر مراجع است. در اینجا، قیدهای تابع هزینه و نحوه برنامه‌نویسی بهبود یافته‌اند؛ به گونه‌ای که با در نظر گرفتن اثر تأخیر زمانی، یک شیوه کارآمد حاصل می‌گردد. همچنین، در شیوه پیشنهادی با استفاده از زیربرنامه بهینه‌سازی سادک، مقدار ضرایب وزنی تابع هدف مقید در هر گام زمانی به‌روزرسانی می‌شوند. شایان توجه است، شیوه به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک در کنترل فعال سازه یکی از نوآوری‌های این پژوهش است. رابطه‌سازی نوین برای تابع هزینه، تعیین ضرایب وزنی در هر گام زمانی و شیوه مدل کردن آن‌ها از دیگر نوآوری‌های این پژوهش می‌باشند. شکل (۱) روندنمای کنترل فعال سازه با الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد.

برای درک نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک در فرایند کنترل سازه، زیر بخش‌های این شیوه ارائه می‌گردد:

در مرحله نخست، جمعیت اولیه‌ای از نیروهای کنترلی مناسب احتمالی با توجه به اطلاعات مسئله تولید می‌شوند. چنانچه اطلاعاتی از طرح‌های ممکن مسئله وجود نداشته باشد، این جمعیت به‌صورت تصادفی انتخاب می‌گردد. این نیروهای تولید شده، همان نیروهای کنترلی عملگر متصل شده به سازه میزبان، در لحظه نخست می‌باشند.

در مرحله دوم، با توجه به آخرین موقعیت مکانی درجه‌های آزادی سازه، معیارهای تابع هدف مقید محاسبه می‌شوند. پس از آن با استفاده از الگوریتم سادک، ضرایب وزنی طوری تعیین می‌شوند تا تابع هدف مقید کمینه شود.

استفاده می‌شود. تاکنون، پژوهش‌های مختلفی برای تعیین مقدار مناسب ضرایب وزنی بر مبنای الگوریتم‌های تکاملی انجام شده است [15-17]. در این پژوهش‌ها، معیارهایی برای انتخاب ضرایب‌های وزنی و دیگر عامل‌های وراثتی ارائه شده‌اند که همه آن‌ها تجربی‌اند و الگوریتم ژنتیک با در نظرگیری ضرایب وزنی ثابت در طول فرایند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. روشن است، هر چه مقدار مناسب‌تری برای این ضرایب انتخاب شود، کارایی الگوریتم ژنتیک افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، تعیین ضرایب وزنی با شیوه‌های متداول، با فرایندهای سعی و خطا، برای هر سازه به صورت جداگانه انجام می‌شود. بنابراین، ممکن است این ضرایب در دیگر مسئله‌ها کارایی لازم را نداشته باشند. به نظر می‌رسد، لازم است به جای یافتن مقدارهای عددی ثابت برای ضرایب وزنی در هر مسئله، شیوه‌ای خودکار برای تعیین این ضرایب متناسب با شرایط سازه در هر گام زمانی، ارائه گردد. در اینجا، هدف تعیین ضرایب وزنی با شیوه‌ای خودکار است. بنابراین، یکی از نوآوری‌های این پژوهش، ارائه روشی برای محاسبه ضرایب وزنی تابع هدف مقید است. در نتیجه، در الگوریتم پیشنهادی، ضرایب وزنی متغیرند و در هر گام زمانی توسط الگوریتم جستجو تعیین می‌شوند و در تابع هدف مقید جایگذاری می‌گردند. در گام نخست روش پیشنهادی، ضرایب وزنی در هر گام زمانی با استفاده از روش سادک تعیین می‌گردند. پس از آن، فرایند جستجوی نیروهای کنترلی انجام می‌شود. فرضیات عمومی الگوریتم سادک مورد استفاده به‌صورت است:

$$\bar{C} = \sum_{k=1}^m |w_k c_k| \quad (8)$$

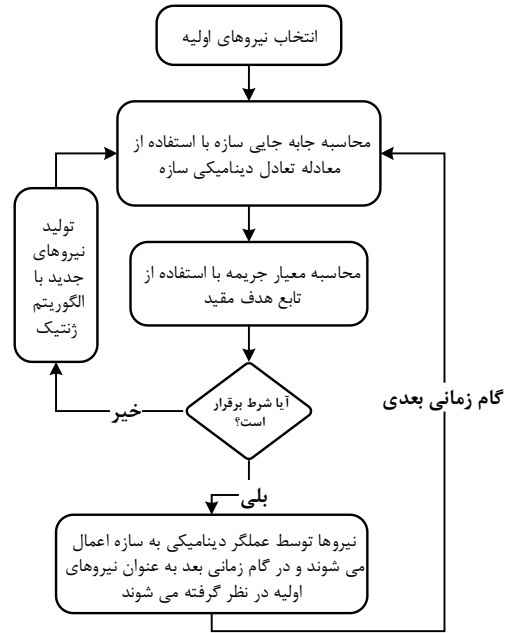
$$\sum_{k=1}^m |w_k| = 1 \quad (9)$$

$$0 \leq w_k \leq 1 \quad (10)$$

در این رابطه‌ها، متغیرهای w_k و c_k به ترتیب k امین ضریب وزنی و قید مسئله بهینه‌سازی هستند. پس از تعیین ضرایب وزنی بهینه، الگوریتم با ثابت پنداشتن آن‌ها، به جستجوی نیروهای کنترلی می‌پردازد. در آغاز فرایند کنترل، جمعیت اولیه‌ای از اعضای مناسب احتمالی (نیروهای کنترلی) توسط الگوریتم تولید می‌شوند. با جایگذاری این اعضا در معادله تعادل دینامیکی سازه، مقدار جابه‌جایی در حالت کنترل‌شده محاسبه می‌شود. در این روند، به هر یک از اعضا، یک مقدار

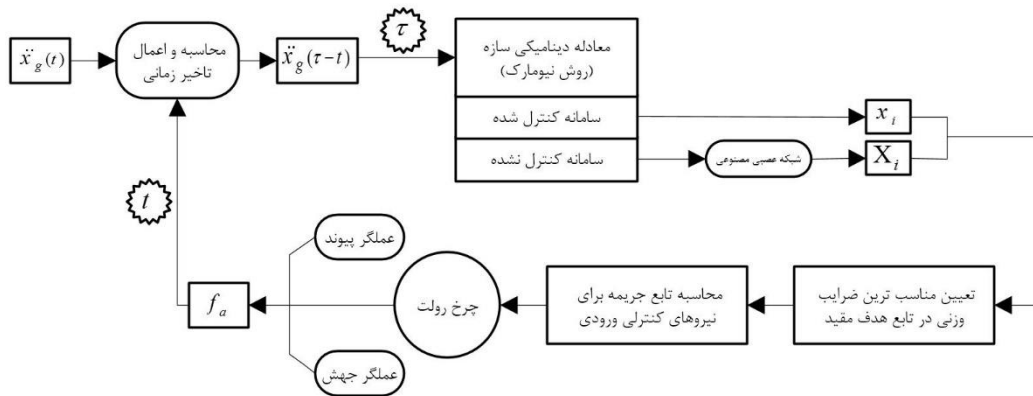
ذخیره شده و توسط عملگرهای متصل به سازه در راستای مورد نظر اعمال می‌گردند. در صورتی که نیروهای دارای بیشترین صلاحیت، در شرایط پایان مسئله صدق نکنند، الگوریتم با بررسی و مرتب کردن نیروها برحسب مقدار صلاحیت متناظر، تعداد مشخصی از آن‌ها را با استفاده از شیوه‌ای از پیش تعریف شده، انتخاب کرده، سپس با استفاده از روش‌های ژنتیکی، نسل جدیدی از داده‌های جمعیتی تولید می‌کند و مرحله سوم تکرار می‌گردد. پس از ارضای شرایط کنترل در مرحله سوم، الگوریتم به مرحله نخست باز می‌گردد و کنترل سازه در گام زمانی بعدی ادامه می‌یابد. همچنین، با توجه به نیاز روش عددی نیومارک به اطلاعات گام زمانی پیشین، داده‌های این گام به‌عنوان شرایط نخستین گام بعد ذخیره می‌شوند.

شایان توجه است، در روش‌های عددی متکی بر سعی و خطا، تأخیر زمانی اثر چشم‌گیری در فرایند کنترل دارد تا آنجا که ممکن است سبب ناپایداری آن گردد. در اینجا، برای در نظر گرفتن اثر تأخیر زمانی، با بهره‌گیری از زیر برنامه‌ای، مدت زمان سپری شده از آغاز ورود الگوریتم به حلقه جستجوی نیروهای کنترلی تا زمان خروج از آن (انتخاب نیروهای کنترلی مناسب در گام زمانی مورد نظر)، ثبت شده و در گام زمانی بعد، این مدت در الگوی بار خارجی و موقعیت سازه در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۲) روند نمای جستجوی عددی هوشمند نوین ارائه شده است. در ادامه، برای بررسی کارایی روش پیشنهادی، نتایج این شیوه در چهار نمونه عددی بررسی می‌گردد.



شکل ۱ روندنمای کنترل فعال سازه با الگوریتم ژنتیک

در مرحله سوم، از حل عددی معادله تعادل دینامیکی سازه در نخستین گام زمانی و جایگذاری نیروهای جمعیت نخستین، مقدار جابه‌جایی متناظر با هر نیرو محاسبه گردیده و زوج دوتایی شامل نیروهای کنترلی و جابه‌جایی متناظر با آن، در فضای برنامه ذخیره می‌گردد. با جایگذاری این مقادیر در تابع هدف مقید که با توجه به قیدها و محدودیت‌های مورد انتظار مسئله و ضرایب وزنی مرحله دوم رابطه‌سازی شده است، مقدار صلاحیت هر یک از نیروهای کنترلی تعیین می‌گردد. چنانچه نیروهای کنترلی دارای بیشترین صلاحیت، شرایط مسئله را محقق نمایند، به‌عنوان پاسخ نهایی در گام زمانی مورد نظر



شکل ۲ روند نمای جستجوی عددی هوشمند نوین

نمونه‌های عددی

برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، برنامه رایانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار متلب (Matlab) تهیه شده است. در برنامه تهیه شده، با مدل‌سازی الگوی سازه برشی ۷، ۱۲ و ۱۵ درجه آزادی تحت تأثیر بارگذاری خارجی، موقعیت درجه‌های آزادی سازه در هر گام ارزیابی می‌شود.

سازه برشی هفت درجه آزادی دینامیکی زیر اثر الگوی بارگذاری زلزله نورتریج

برای صحت‌سنجی الگوریتم نوین پیشنهادی، از الگوی سازه برشی هفت درجه آزادی معرفی شده در مرجع [14] استفاده می‌شود. در نمونه عددی معرفی شده در پژوهش پیشین، سازه زیر اثر الگوی بارگذاری زلزله نورتریج به‌عنوان زلزله در حوزه نزدیک (RSN:1086 peer) قرار گرفت و نتایج حاصل‌شده در حالت استفاده از روش الگوریتم ژنتیک با در نظرگیری ضرایب ثابت و روش الگوریتم LQR باحالت بدون کنترل مقایسه شدند. شایان توجه است، الگوریتم نوین پیشنهادی دارای مبانی یکسانی با الگوریتم ژنتیک اشاره شده در مرجع [14] می‌باشد ولی از جمله نوآوری‌های آن می‌توان به بهینه‌تر شدن الگوریتم کنترل از جنبه برنامه‌نویسی، تغییر در قیدهای استفاده شده در تابع هدف مقید و در نظرگیری ضرایب وزنی به‌صورت متغیر اشاره کرد. در جدول (۱) مشخصات جرم و سختی معادل سازه درج شده است. همچنین، ارتفاع طبقات برابر ۳/۵ متر است.

جدول ۱ مشخصات جرم و سختی معادل سازه برشی هفت درجه آزادی

درجه آزادی دینامیکی	M * 10 ⁵ (kg)	K ($\frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$) * 10 ⁸
۱	۲,۲۵	۲,۷۷۹
۲	۲,۲۵	۲,۷۷۹
۳	۲,۲۵	۲,۷۷۹
۴	۲,۲۵	۲,۴۳۱
۵	۲,۲۵	۲,۰۸۷
۶	۲,۲۵	۱,۷۳۷
۷	۱,۵۸	۰,۶۹۵

در این سازه، عملگرهای دینامیکی به هر یک از درجه‌های آزادی متصل می‌شوند (هفت عملگر در کل سازه). همچنین، در هر یک از درجه‌های آزادی، حسگری برای پایش سازه وجود خواهد داشت. نسبت میرایی برای سه مود نخست نوسان ۵٪ و در دیگر مودهای نوسان نامیرا پنداشته شده است. در این سازه، از الگوی میرایی ریلی دو عاملی برای تعیین ماتریس میرایی سازه استفاده می‌شود [20]. میانگین تأخیر زمانی ثبت شده توسط الگوریتم کنترل در هر گام زمانی برابر 0/023 ثانیه است. همچنین، تعداد اعضای جمعیت تولید شده توسط الگوریتم، ۶ عضو و تعداد تلاش در هر گام زمانی، ۲۰ سعی می‌باشند. مدل بهینه‌سازی سادک برای تعیین ضرایب وزنی در این مسئله به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\bar{C} = w_1 c_1 + w_2 c_2 + w_3 c_3 + w_4 c_4 \quad (11)$$

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1 \quad (12)$$

$$w_1 \leq w_2 + w_3 + w_4 \quad (13)$$

$$w_2 \leq w_1 + w_3 + w_4 \quad (14)$$

$$w_3 \leq w_1 + w_2 + w_4 \quad (15)$$

$$w_4 \leq w_1 + w_2 + w_3 \quad (16)$$

$$0 \leq w_k \leq 1 \quad (17)$$

در این صورت ماتریس ضرایب مدل بهینه‌سازی به‌صورت K_{eq} و K تعریف می‌گردد:

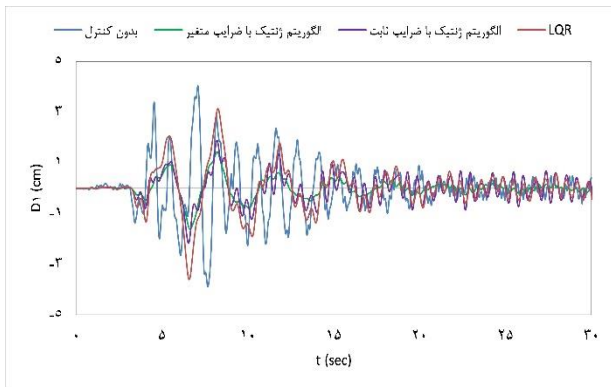
$$K_{eq} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1] \quad (18)$$

$$(K)^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

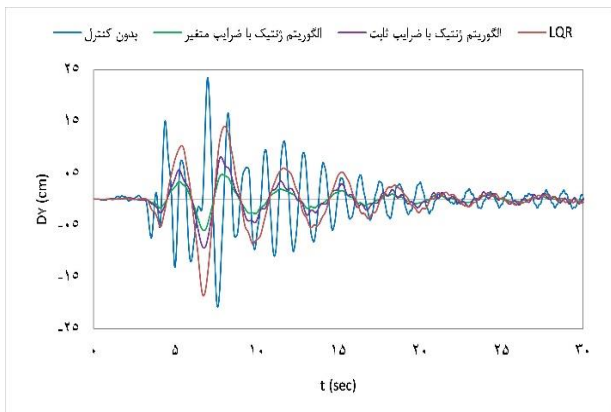
در اینجا، K_{eq} ماتریس ضرایب برابری در مدل ریاضی بهینه‌سازی به روش سادک است. تنها شرط برابری استفاده شده، رابطه (۱۲) است. همچنین، K ماتریس ضرایب نابرابری است که رابطه‌های (۱۳) تا (۱۷) به‌وسیله این ماتریس به برنامه معرفی می‌شوند. با استفاده از این دو ماتریس، دستگاه معادلات بهینه‌سازی برای معادلات برابری و نابرابری تعریف می‌شود. این مدل ریاضی قادر است تا با حل دستگاه معادلات زیر، مقدار ضرایب تابع هدف را بهینه نمایند.

$$[K_{eq}]_{1 \times k} [W]_{k \times 1} = [I]_{1 \times 1} \quad (20)$$

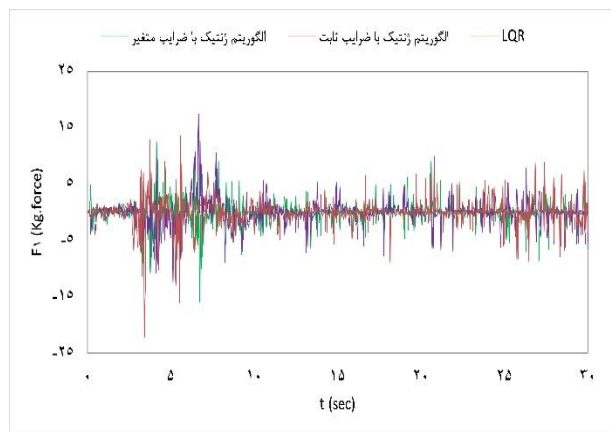
در هر گام زمانی است.



شکل ۳ تاریخچه زمانی جابه‌جایی نخستین درجه آزادی سازه هفت‌طبقه با الگوریتم ژنتیک پیشنهادی زیر اثر الگوی بار زلزله نورث‌ریچ



شکل ۴ تاریخچه زمانی جابه‌جایی هفتمین درجه آزادی سازه هفت‌طبقه با الگوریتم ژنتیک پیشنهادی زیر اثر الگوی بار زلزله نورث‌ریچ



شکل ۵ تاریخچه زمانی نیروی کنترلی نخستین درجه آزادی سازه هفت‌طبقه با الگوریتم ژنتیک پیشنهادی زیر اثر الگوی بار زلزله نورث‌ریچ

$$[K]_{2k \times k} [W]_{k \times 1} \leq [J]_{2k \times 1} \quad (21)$$

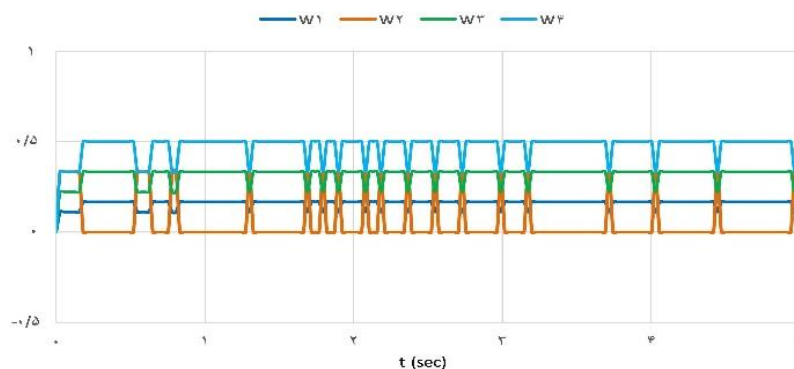
در رابطه (۲۲) ماتریس J برابر با مقدار زیر است:

$$(J)^T = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (22)$$

با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، نوسان‌های سازه کنترل می‌شوند. برای مقایسه کارایی روش نوین پیشنهادی، نمودارهای جابه‌جایی- زمان برای درجه‌های آزادی نخست و هفتم سازه به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) ترسیم شده‌اند. این نمودارها، برای حالت‌های بدون کنترل، الگوریتم کنترلی LQR، الگوریتم ژنتیک ارائه شده در مرجع [14] بدون بهبودهای صورت گرفته در این پژوهش از جمله روش ضرایب وزنی متغیر و در نهایت، روش الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در پژوهش حاضر که دارای بهبود در تابع هدف مقید و استفاده از ضرایب وزنی متغیر در طول زمان فرایند کنترل است، ترسیم شده‌اند. همچنین بیشینه جابه‌جایی طبقات در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند، شیوه پیشنهادی، نوسان‌های سازه در برابر تحریک خارجی را به‌طور فراوانی کاهش می‌دهد. میزان بهبود الگوریتم نوین در مقایسه با حالت بدون کنترل، الگوریتم LQR و الگوریتم ژنتیک با ضرایب ثابت به ترتیب برابر با ۷۴، ۶۵ و ۳۸ درصد است. تاریخچه نیروهای کنترلی در طول مدت زمان کنترل در شکل‌های (۵) نمایش داده شده است. روشن است، مقدار نیروی عملگر به‌اندازه‌ای کوچک است که می‌توان آن را با ابزار و شیوه‌های متداول به سازه اعمال کرد. همچنین، به‌کارگیری چندین عملگر در هر طبقه سبب می‌شود تا دقت و پایداری سامانه کنترل افزایش یابد. با افزایش تعداد عملگرها، نیروی آن‌ها کاهش می‌یابد، در نتیجه می‌توان این شیوه را در سازه‌های واقعی به‌راحتی اجرا کرد. بیشینه نیروهای کنترلی برای کلیه طبقات در جدول (۳) ارائه شده است. تاریخچه تغییرات ضرایب وزنی نیز در شکل (۶) ارائه شده است. الگوریتم بهینه‌سازی سادک در هر گام زمانی ضرایب وزنی را به‌گونه‌ای تعیین می‌کند تا ضمن برآورده کردن شرایط برابری و نابرابری، مقدار تابع هدف مقید کمینه گردد. با توجه به ماهیت تصادفی بودن الگوریتم ژنتیک، تغییرات ضرایب وزنی نیز در طول فرایند کنترل، متغیر و وابسته به کمیت قیدها

جدول ۲ مقایسه بیشینه جابه‌جایی طبقات برای سازه هفت‌طبقه زیر اثر الگوی بار زلزله نورتریج

بیشینه جابه‌جایی (cm)				درجه آزادی
الگوریتم ژنتیک با ضرایب متغیر	الگوریتم ژنتیک با ضرایب ثابت	LQR	بدون کنترل	
۱,۶۱	۲,۱۷	۳,۶۰	۴,۰۵	۱
۲,۷۱	۳,۶۲	۶,۸۶	۷,۷۸	۲
۳,۶۴	۵,۴۰	۸,۵۳	۱۱,۴۸	۳
۴,۲۲	۶,۷۲	۱۱,۹۲	۱۵,۰۸	۴
۴,۵۶	۷,۸۳	۱۳,۵۳	۱۸,۷۱	۵
۵,۸۴	۹,۱۲	۱۵,۷۲	۲۱,۳۸	۶
۶,۰۳	۹,۶۶	۱۷,۳۷	۲۳,۴۶	۷



شکل ۶ تاریخچه تغییرات ضرایب وزنی در کنترل سازه هفت‌طبقه با الگوریتم ژنتیک پیشنهادی زیر اثر الگوی بار زلزله نورتریج

جدول ۳ مقایسه بیشینه نیروی کنترلی طبقات برای سازه هفت‌طبقه زیر اثر الگوی بار زلزله نورتریج

بیشینه نیروی کنترلی عملگر دینامیکی (Kg. Force)			درجه آزادی
الگوریتم ژنتیک با ضرایب متغیر	الگوریتم ژنتیک با ضرایب ثابت	LQR	
۱۶,۶۴	۱۷,۳۶	۲۲,۰۵	۱
۱۴,۳۱	۱۶,۴۵	۱۷,۴۶	۲
۱۹,۷۴	۲۵,۱۲	۲۵,۱۳	۳
۱۶,۸۷	۱۵,۷۱	۱۶,۷۱	۴
۱۸,۴۱	۱۳,۴۲	۱۷,۰۲	۵
۱۹,۷۴	۱۸,۲۲	۱۸,۲۲	۶
۲۱,۰۹	۱۵,۵۴	۲۱,۰۳	۷

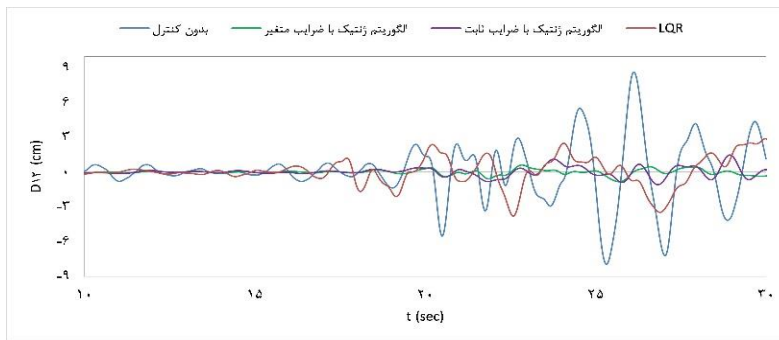
سازه برشی دوازده درجه آزادی دینامیکی زیر اثر الگوی بارگذاری زلزله کوبه

در اینجا، سازه دوازده درجه آزادی تحت شتاب پایه زلزله کوبه در حوزه دور (peer RSN:1105) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مشخصات سازه در جدول (۴) ارائه شده و ارتفاع طبقات ۳٫۵ متر است. در این سازه، نسبت میرایی برای سه مود نخست نوسان ۰٫۵٪ پنداشته می‌شود و دیگر مودهای نوسان نامیرا می‌باشند. این سازه با شتاب پایه زلزله کوبه تحریک می‌شود. در هر درجه آزادی یک عملگر نصب می‌گردد. گام زمانی تحلیل برابر ۰٫۱ ثانیه، تعداد عضوهای جمعیت تولید شده توسط الگوریتم ژنتیک، ۸ عضو و تعداد تلاش در هر گام زمانی، ۲۰ بار فرض می‌گردد. نسبت عملگر پیوند و جهش بر روی اعضا مشابه نمونه عددی قبل است. در این حالت، میانگین تأخیر

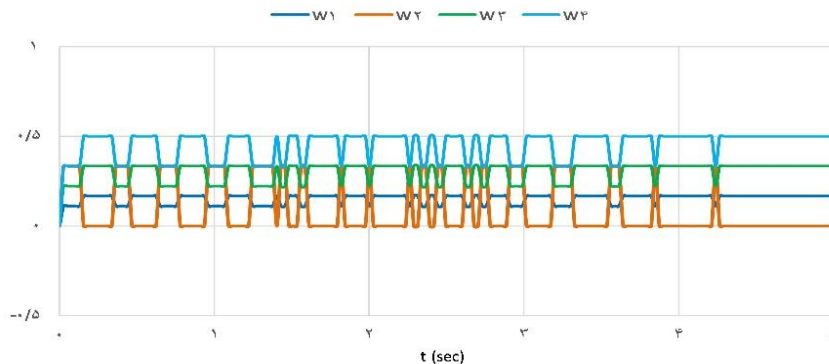
زمانی محاسبه شده توسط الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، در هر گام زمانی، ۰٫۰۲۷ ثانیه است. با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، نوسان‌های سازه کنترل می‌شوند. نمودار جابه‌جایی - زمان دوازدهمین درجه آزادی در شکل (۷) رسم شده است. بیشینه جابه‌جایی سازه در جدول (۵) آورده شده است. عملکرد بسیار مناسب روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌های ارائه شده قابل دریافت است. میزان بهبود الگوریتم نوین در مقایسه با حالت بدون کنترل، الگوریتم LQR و الگوریتم ژنتیک با ضرایب ثابت به ترتیب برابر با ۹۳، ۷۳ و ۴۳ درصد است. از سوی دیگر، نیروی بیشینه کنترلی مورد نیاز در هر طبقه در جدول (۶) ارائه شده است. نمودار تغییرات ضریب وزنی در شکل (۸) ارائه شده است.

جدول ۴ مشخصات جرم و سختی معادل سازه برشی دوازده درجه آزادی

درجه آزادی دینامیکی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
M (kg) * 10 ⁵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵
K ($\frac{kg}{cm}$) * 10 ⁸	۲/۷۷۹	۲/۷۷۹	۲/۴۳۱	۲/۴۳۱	۲/۰۸۴	۲/۰۸۴	۲/۰۸۴	۱/۰۴۲	۱/۰۴۲	۱/۰۴۲	۰/۶۹۵	۰/۳۷۰



شکل ۷ تاریخچه زمانی جابه‌جایی دوازدهمین درجه آزادی سازه دوازده طبقه با الگوریتم ژنتیک پیشنهادی زیر اثر الگوی بار زلزله کوبه



شکل ۸ تاریخچه تغییرات ضرایب وزنی در کنترل سازه دوازده طبقه با الگوریتم ژنتیک پیشنهادی زیر اثر الگوی بار زلزله کوبه

جدول ۵ مقایسه بیشینه جابه‌جایی طبقات برای سازه دوازده طبقه زیر اثر الگوی بار زلزله کوبه

درجه آزادی دینامیکی												بیشینه جابه‌جایی (cm)	
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۱۲,۸۱	۱۲,۲۳	۸,۹۶	۷,۷۲	۷,۰۳	۶,۶۷	۶,۲۷	۵,۰۳	۴,۳۰	۳,۱۸	۲,۲۱	۱,۱۳		بدون کنترل
۲,۸۸	۳,۱۴	۲,۶۷	۲,۵۳	۲,۰۴	۲,۰۳	۱,۷۸	۱,۶۵	۱,۳۲	۰,۹۵	۰,۴۲	۰,۳۸		LQR
۱,۴۸	۱,۱۴	۱,۱۲	۱,۱۳	۱,۱۲	۰,۹۴	۰,۹۱	۰,۸۶	۰,۷۲	۰,۶۷	۰,۶۳	۰,۵۶	الگوریتم ژنتیک با ضرایب ثابت	
۰,۸۴	۰,۸۲	۰,۸۴	۰,۷۵	۰,۷۶	۰,۸۳	۰,۸۴	۰,۷۲	۰,۶۲	۰,۵۷	۰,۶۲	۰,۵۸	الگوریتم ژنتیک با ضرایب متغیر	

جدول ۶ مقایسه بیشینه نیروی کنترلی طبقات برای سازه دوازده طبقه زیر اثر الگوی بار زلزله کوبه

درجه آزادی دینامیکی												بیشینه نیروی کنترلی عملگر دینامیکی (Kg. Force)	
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۸,۰۴	۹,۹۴	۸,۰۴	۱۱,۰۳	۸,۹۴	۱۰,۷۱	۱۰,۲۳	۹,۳۲	۹,۶۲	۹,۸۷	۹,۷۱	۹,۴۹		LQR
۶,۶۱	۶,۳۶	۷,۶۵	۹,۱۴	۸,۱۳	۷,۶۳	۹,۱۵	۸,۹۱	۸,۰۳	۹,۰۱	۹,۶۲	۹,۲۳		الگوریتم ژنتیک با ضرایب ثابت
۶,۰۳	۸,۱۲	۶,۱۴	۷,۵۲	۸,۶۴	۷,۵۴	۸,۱۷	۶,۸۴	۷,۱۴	۸,۲۳	۹,۰۳	۹,۱۱	الگوریتم ژنتیک با ضرایب متغیر	

جدول ۷ مشخصات جرم و سختی معادل سازه برشی پانزده درجه آزادی

درجه آزادی دینامیکی															
۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۱/۲۶	۱/۸۰	۱/۸۰	۱/۸۰	۱/۸۰	۱/۸۰	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	M (kg) * 10 ⁵
۰/۶۹	۱/۳۹	۱/۰۴	۱/۳۹	۲/۰۸	۱/۷۴	۱/۳۹	۱/۳۹	۲/۰۸	۲/۰۸	۲/۰۸	۲/۴۳	۲/۴۳	۲/۷۸	۲/۷۸	K ($\frac{kg}{cm}$) * 10 ⁸

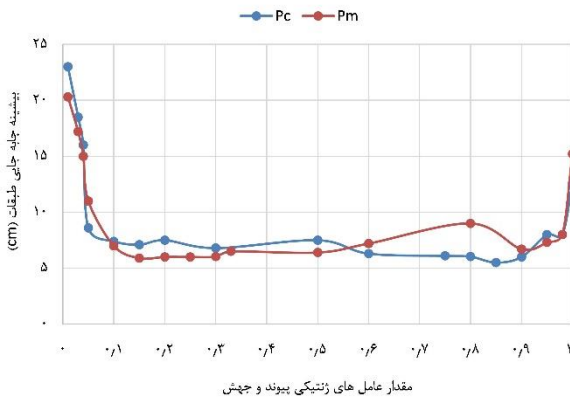
جدول ۸ مقایسه بیشینه جابه‌جایی طبقات سازه پانزده طبقه زیر اثر الگوی بار زلزله طبس

درجه آزادی دینامیکی															
۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۱۸,۴	۱۸,۳	۱۷,۹	۱۶,۲	۱۵,۶	۱۵,۰	۱۴,۰	۱۲,۴	۹,۸	۷,۷	۶,۷	۴,۸	۳,۴	۲,۵	۱,۹	بدون کنترل
۱۱,۶	۱۱,۱	۱۰,۸	۱۱,۴	۹,۳	۱۱,۴	۱۰,۸	۸,۱	۶,۷	۵,۸	۵,۱	۳,۷	۲,۹	۲,۱	۱,۳	LQR
۹,۹	۱۰,۷	۱۰,۱	۱۰,۲	۸,۷	۷,۵	۷,۸	۶,۶	۶,۲	۵,۶	۴,۸	۳,۵	۳,۲	۲,۲	۱,۲	الگوریتم ژنتیک با ضرایب ثابت
۹,۲	۸,۹	۸,۲	۹,۸	۸,۷	۶,۷	۶,۱	۵,۳	۵,۴	۴,۶	۳,۶	۲,۸	۲,۲	۱,۸	۰,۷	الگوریتم ژنتیک با ضرایب متغیر

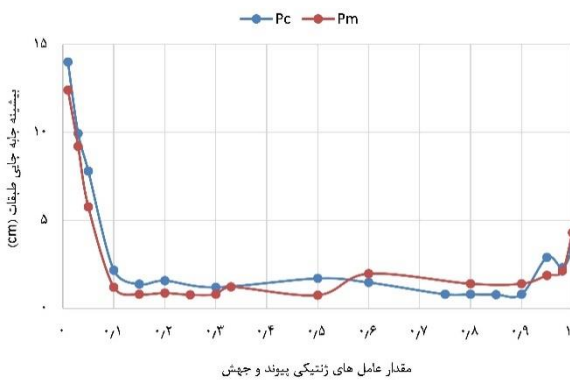
سازه برشی پانزده درجه آزادی دینامیکی زیر اثر الگوی بارگذاری زلزله طبس

مشخصات دینامیکی این سازه در جدول (۷) ارائه شده است. همچنین، ارتفاع کلیه طبقات برابر ۳/۵ متر است. این سازه تحت شتاب پایه زلزله طبس در حوزه نزدیک (peer RSN:143) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نسبت میرایی سازه برای پنج مود نخست نوسان برابر با ۵٪ و دیگر مودهای نوسان نامیرا می‌باشند. این سازه با شتاب پایه زلزله طبس تحریک می‌شود. در هر درجه

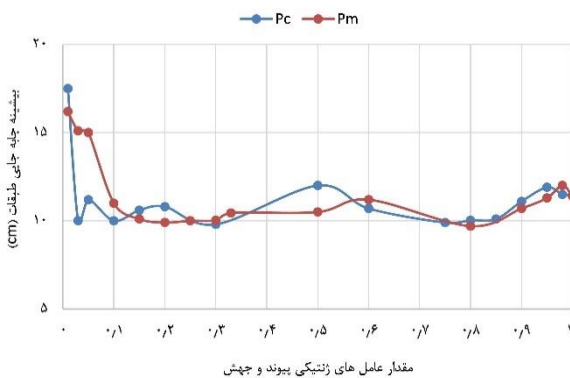
آزادی یک عملگر نصب می‌گردد. گام زمانی تحلیل برابر ۰.۲ ثانیه و سایر مشخصات مشابه با نمونه‌های عددی قبل است. در این حالت، میانگین تأخیر زمانی محاسبه شده در هر گام زمانی برابر با ۰.۳۴ ثانیه است. میزان بهبود الگوریتم نوین در مقایسه با حالت بدون کنترل، الگوریتم LQR و الگوریتم ژنتیک با ضرایب ثابت به ترتیب برابر با ۵۰، ۲۰ و ۱۴ درصد است. مقدار بیشینه جابه‌جایی طبقات در جدول (۸) ارائه شده است.



شکل ۹ بررسی تأثیر مقدار عملگرهای ژنتیک بر کارایی الگوریتم ژنتیک نوین در سازه هفت طبقه زیر اثر زلزله نورث ریج



شکل ۱۰ بررسی تأثیر مقدار عملگرهای ژنتیک بر کارایی الگوریتم ژنتیک نوین در سازه دوازده طبقه زیر اثر زلزله کوبه



شکل ۱۱ بررسی تأثیر مقدار عملگرهای ژنتیک بر کارایی الگوریتم ژنتیک نوین در سازه پانزده طبقه زیر اثر زلزله طیس

مدل سازی قاب سه طبقه بتنی

در ادامه جهت بررسی کارایی شیوه کنترل فعال پیشنهادی در شرایط واقعی تر سازه، یک قاب بتنی چهار دهانه و سه طبقه در برنامه اپنسیس مدل سازی شده و نتایج در حالت کنترل شده و

حساسیت سنجی ضرایب ژنتیکی

همان طور که پیش تر بیان شد، استفاده از عملگرهای پیوند و جهش به عنوان ضرایب ژنتیکی نقش بسیار مهمی در عملکرد الگوریتم ژنتیک دارد. انتخاب این مقادیر با توجه به نوع و شرایط مسئله تعیین می شود. در پژوهش های پیشین، پژوهشگران مقدار ضرایب پیوند و جهش را با استفاده از شیوه سعی و خطا تعیین و پس از آن پس از انجام تحلیل های متوالی تصحیح نمودند [22]. در مراجع گوناگون دامنه انتخابی برای این ضرایب به صورت زیر ارائه شده است:

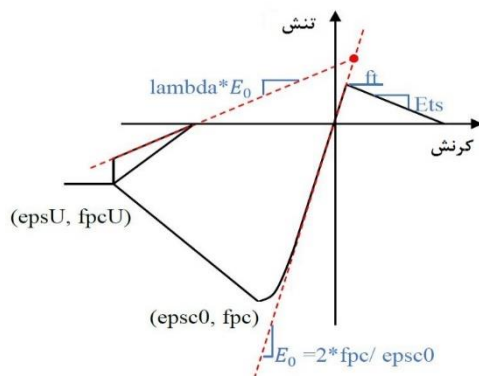
$$P_C = [0,6 , 0,9] \quad (23)$$

$$P_M = \left[\frac{1}{\text{population size}} , \frac{1}{\text{chromosome length}} \right] \quad (24)$$

رابطه (۲۴) دامنه انتخابی نسبت عملگر جهش را بر روی جمعیت نشان می دهد. در این رابطه کران پایین برابر با حاصل تقسیم یک بر تعداد اعضای جمعیت و کران بالا برابر با حاصل یک تقسیم بر طول کروموزوم (تعداد متغیر جستجو) است. در این پژوهش به منظور حساسیت سنجی الگوریتم پیشنهادی، این ضرایب در بازه $[0, 1]$ با نمونه های 0/1 ترسیم و نتایج مقایسه شدند.

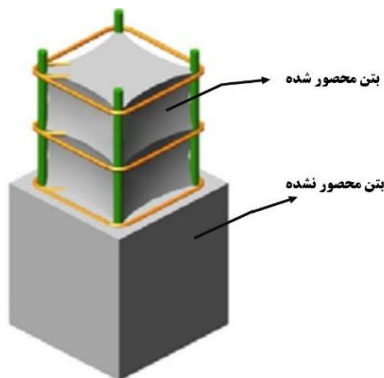
شکل های (۹) تا (۱۱) در حالت استفاده از تابع هدف غیر مقید (بدون ضرایب وزنی قیدهای چهارگانه) و برای نمونه های عددی ارائه شده پیشین به صورت میانگین گیری شده ترسیم گردیده اند. نمودارهای فوق نشان می دهد مقدارهای انتخاب شده $P_M = 0,3$, $P_C = 0,8$ روش خواهند بود. با توجه به ارتباط ضرایب پیوند و جهش جهت ترسیم هر یک از نمودارها، ضریب در نمودار دیگر برابر با مقدار منتخب در نظر گرفته شده است. این مقادیر با استفاده از تلاش های متوالی در شرایط مختلف توسط نویسندگان تعیین گردیده اند. شایان توجه است، الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در حل نمونه های عددی این پژوهش به دلیل ساده سازی های مدل سازی و همچنین بهینه سازی برنامه الگوریتم ژنتیک بسیار کارآمد بوده و تغییر در دامنه این نسبت ها تغییر محسوسی در پاسخ ها ایجاد نمی کند.

کششی است. همچنین λ نسبت شیب باربرداری در نقطه کرنش در مقاومت گسیختگی بتن به شیب اولیه است.



شکل ۱۲ تعریف مصالح "Concrete02" در برنامه اپنسیس [24]

مصالح بتن برای مقطع تیر و ستون در دو حالت محصور شده و محصور نشده در برنامه تعریف می‌گردد. با مراجعه به کتابخانه مصالح بتن آرمه که در سال ۲۰۰۶ توسط سیلویا مازونی و فرانک مکنا توسعه یافت، مقدار این پارامترها برای تمامی مقاطع در دو حالت در نظر گرفته می‌شود [22]. بتن محصور شده که در راستای در نظر گرفتن اثر محصورشدگی بتن توسط خاموت به هسته مقاطع اختصاص داده شده و بتن محصور نشده که به پوشش مقاطع اختصاص می‌یابد.



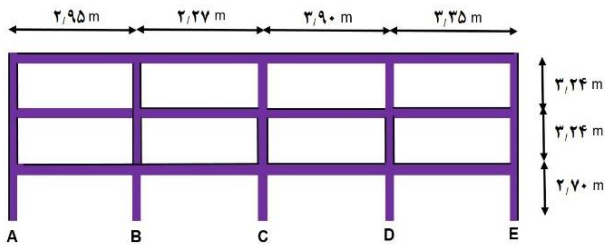
شکل ۱۳ وضعیت محصورشدگی بتن مقاطع در برنامه اپنسیس [25]

مدول الاستیسیته بتن برابر با $E_c = 2 \times 10^4 \text{Mpa}$ تعریف شده و همچنین نسبت بواسون برابر با $\nu = 0.15$ پنداشته شده است. نسبت مقاومت فشاری بتن محصور شده به محصور نشده برابر $1/3$ فرض شده است. در نتیجه، در جدول (۹) مشخصات دو نوع مصالح بتنی مورد استفاده ارائه شده است.

بدون کنترل ارائه می‌گردد. قاب خمشی بتن مسلح در برنامه اجزای محدود اپنسیس و به صورت غیر خطی مدل گردیده است. در اینجا، فرض بر این است که هر دال کف به عنوان یک دیافراگم صلب در جهت افقی عمل می‌کند و جرم هر طبقه نیز به عنوان یک جرم توده‌ای به مرکز دیافراگم مربوط اختصاص می‌یابد. همچنین، بارهای ثقلی به هر گره اختصاص داده می‌شود. تیرها و ستون‌ها با استفاده از المان "Displacement-based Beam-Column" مبتنی بر جابه‌جایی با ۹ نقطه انتگرال‌گیری در طول آن‌ها تعریف می‌شوند. با توجه به آنکه در سازه‌های قاب خمشی، مفاصل پلاستیک خمشی ابتدا در تیرها و در صورت افزایش نیروهای جانبی اعمال شده به سازه، در ستون‌ها ایجاد می‌شوند، از مدل ساده اتصال تیر به ستون در این پژوهش استفاده شده است. شایان توجه است که این نحوه اتصال در نمونه ارائه شده در سایت اپنسیس پیشنهاد گردیده است [22]. بارگذاری ثقلی بر روی گره‌های انتهایی تیرها قرار داده شد و طراحی مقاطع با توجه به آئین‌نامه بارگذاری و مبحث نهم مقررات ملی ایران انجام گردیده است. در این مدل برای در نظر گرفتن اثر غیر خطی آرماتور در تحلیل غیر خطی تاریخچه زمانی، از دستور "Steel02" موجود در کتابخانه مصالح اپنسیس و برای بتن نیز از دستور "Concrete02" استفاده شده است [23,24]. از ویژگی‌های این مصالح، می‌توان به سخت‌شوندگی کرنشی همگون و همچنین استهلاک انرژی چرخه‌ای (در هر چرخه‌ی نیرو- تغییر مکان) اشاره نمود. حائز اهمیت است که در فرمول‌بندی این مصالح، زوال چرخه‌ای و یکنواختی در نظر گرفته نشده است. بنابراین نتایج این مطالعه تحلیلی به شرط عدم وقوع تغییرشکل‌های پلاستیک قابل توجه، معتبر است. در این سازه، ارتفاع طبقه نخست برابر با ۲٫۷ متر و سایر طبقات برابر با ۳٫۲۴ متر می‌باشد. ویژگی مصالح در طراحی مدل دارای خواصی است که در ادامه توضیح داده شده است.

در فرایند تعریف مصالح، مشخصات بتن با استفاده از متغیرهای ارائه‌شده در شکل (۱۲) تعریف می‌گردد. در این شکل متغیرهای fpc ، $eps0$ ، $fpcu$ ، $epsU$ و ft به ترتیب مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن، کرنش متناظر بتن در بیشینه مقاومت، مقاومت گسیختگی بتن، کرنش در مقاومت گسیختگی بتن، مقاومت کششی بتن و E_{ts} شیب نرم‌شدگی بتن در ناحیه

جدول ۹ مشخصات مصالح بتنی در مدل سازی [22]



شکل ۱۴ مشخصات هندسی قاب در برنامه اپنسیس

بتن محصور نشده	بتن محصور شده
$f_{pc}(f'_{cu}) = 24,510 \text{ Mpa}$	$f_{pc}(f'_{cc}) = 31,85 \text{ Mpa}$
$epsc0 = 0,0030$	$epsc0 = 0,0032$
$f_{pcU} = 4,902$	$f_{pcU} = 6,370$
$epsU = 0,010$	$epsU = 0,064$
$f_{tu} = 3,431$	$f_{tu} = 5,797$
$E_{ts} = 0,007$	$E_{ts} = 0,064$

در جدول (۱۲) حرف C نشان دهنده آرماتورهای اصلی و حرف A نشان دهنده آرماتورهای تقویتی در مقاطع تیر و ستون می باشند. در ادامه نتایج حاصل از کنترل فعال قاب زیر اثر الگوی بار زلزله نورث ریج، کوبه و طبس برای حالت کنترل شده و کنترل نشده ارائه شده است.

شایان ذکر است مشخصات میلگرد مصرفی نیز با توجه به مصالح "Steel02" دارای مشخصات $F_y = 294,19 \text{ Mpa}$ و $E_c = 2 \times 10^5 \text{ Mpa}$ است. در ادامه مشخصات هندسی و مقاطع قاب چهار دهانه سه طبقه ارائه شده است.

جدول ۱۰ تیپ مقطع تیرهای قاب در برنامه اپنسیس

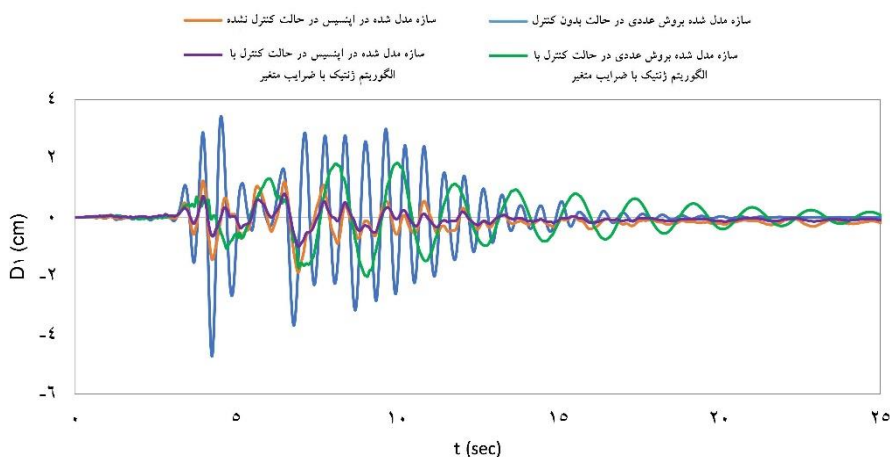
EF			CD			BC			AB			المان
۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	طبقه
B4	B3	B2	B4	B3	B1	B4	B3	B1	B4	B3	B1	تیپ مقطع

جدول ۱۱ تیپ مقطع ستونهای قاب در برنامه اپنسیس

D			C			B			A			المان
۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	طبقه
C3	C2	C1	C3	C2	C1	C3	C2	C1	C3	C2	C1	تیپ مقطع

جدول ۱۲ جزئیات مقطع تیر و ستون قاب در برنامه اپنسیس

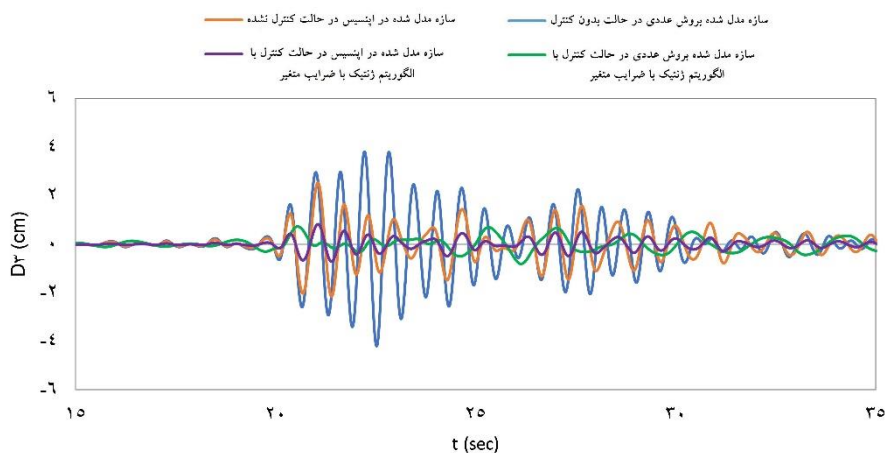
AR_{bottom}	AR_{top}	CR_{left}	CR_{right}	CR_{bottom}	CR_{top}	ارتفاع مقطع (mm)	عرض مقطع (mm)	المان
1#18	2#18	-	-	3#16	3#16	۴۰۰	۴۰۰	B1
-	2#18	-	-	3#16	3#16	۴۰۰	۴۰۰	B2
1#18	1#18	-	-	3#16	3#16	۴۰۰	۴۰۰	B3
-	1#16	-	-	3#14	3#14	۳۵۰	۳۵۰	B4
-	-	4#18	4#18	4#18	4#18	۴۰۰	۴۰۰	C1
-	-	3#18	3#18	3#18	3#18	۴۰۰	۴۰۰	C2
-	-	3#16	3#16	3#16	3#16	۳۵۰	۳۵۰	C3



شکل ۱۵ مقایسه تاریخچه زمانی کنترل شده و کنترل نشده جابه‌جایی نخستین طبقه قاب برای الگوریتم ژنتیک با ضرایب متغیر زیر الگوی بار زلزله نورث‌ریج در برنامه متلب و مدل غیرخطی

جدول ۱۳ مقایسه بیشینه جابه‌جایی طبقات سازه سه طبقه زیر اثر الگوی بار زلزله نورث‌ریج در برنامه متلب و مدل غیر خطی

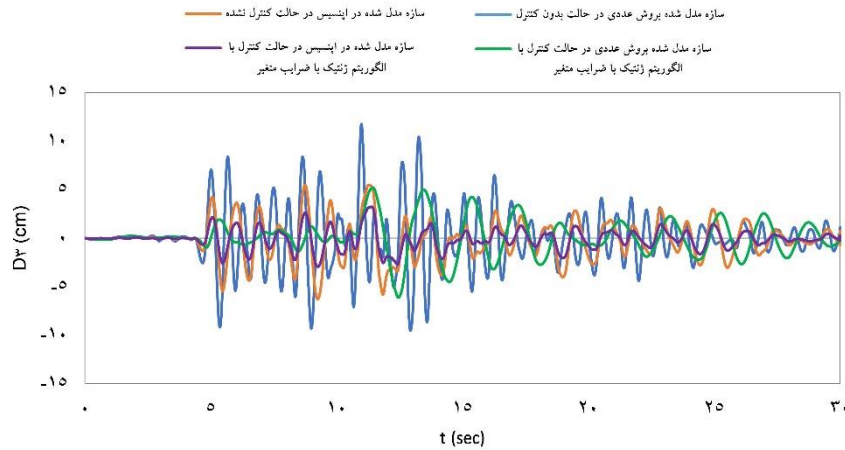
درجه آزادی دینامیکی	جابه‌جایی در مدل عددی بدون کنترل (cm)	جابه‌جایی در مدل غیرخطی بدون کنترل (cm)	جابه‌جایی در مدل عددی کنترل شده (cm)	جابه‌جایی در مدل غیرخطی کنترل شده (cm)
۱	۳٫۴۳	۱٫۲۴	۱٫۸۴	۰٫۷۹
۲	۶٫۸۱	۳٫۶۴	۳٫۶۶	۲٫۱۶
۳	۸٫۸۵	۴٫۴۵	۴٫۹۲	۲٫۵۲



شکل ۱۶ مقایسه تاریخچه زمانی کنترل شده و کنترل نشده جابه‌جایی سومین طبقه قاب برای الگوریتم ژنتیک با ضرایب متغیر زیر الگوی بار زلزله کوبه در برنامه متلب و مدل غیرخطی

جدول ۱۴ مقایسه بیشینه جابه‌جایی طبقات سازه سه طبقه زیر اثر الگوی بار زلزله کوبه در برنامه متلب و مدل غیر خطی

درجه آزادی دینامیکی	جابه‌جایی در مدل عددی بدون کنترل (cm)	جابه‌جایی در مدل غیرخطی بدون کنترل (cm)	جابه‌جایی در مدل عددی کنترل شده (cm)	جابه‌جایی در مدل غیرخطی کنترل شده (cm)
۱	۱٫۴۹	۰٫۸۵	۰٫۳۲	۰٫۲۷
۲	۲٫۹۶	۲٫۳۲	۰٫۵۳	۰٫۷۵
۳	۳٫۸۱	۲٫۵۳	۰٫۷۳	۰٫۸۲



شکل ۱۷ مقایسه تاریخیچه زمانی کنترل شده و کنترل نشده جابه‌جایی سومین طبقه قاب برای الگوریتم ژنتیک با ضرایب متغیر زیر الگوی بار زلزله طبس در برنامه متلب و مدل غیرخطی

جدول ۱۵ مقایسه بیشینه جابه‌جایی طبقات سازه سه طبقه زیر اثر الگوی بار زلزله طبس در برنامه متلب و مدل غیرخطی

درجه آزادی دینامیکی	جابه‌جایی در مدل عددی بدون کنترل (cm)	جابه‌جایی در مدل غیرخطی بدون کنترل (cm)	جابه‌جایی در مدل عددی کنترل شده (cm)	جابه‌جایی در مدل غیرخطی کنترل شده (cm)
۱	۴٫۴۰	۲٫۰۵	۲٫۲۱	۱٫۱۵
۲	۸٫۷۴	۵٫۳۷	۴٫۴۳	۳٫۰۲
۳	۱۱٫۷۵	۵٫۴۹	۵٫۲۱	۳٫۲۴

جستجوی عددی الگوریتم ژنتیک برای یافتن مقادارهای بهینه نیروهای کنترلی عملگرها استفاده می‌کند. برای یافتن ضرایب وزنی مناسب از روش بهینه‌سازی سادک استفاده شد. از نوآوری‌های این پژوهش، ارائه تابع هدف پیشنهادی به‌عنوان معیار کنترل، پنداشتن تعیین ضرایب وزنی تابع هدف مقید به صورت متغیر و یافتن آن‌ها در هر گام زمانی و بهینه‌سازی فرایند برنامه‌نویسی در راستای کاهش تأخیر زمانی در فرایند کنترل است. چهار نمونه عددی خطی برای بررسی کارایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی ارائه شد. در ادامه، یک قاب بتنی غیرخطی نیز مدل‌سازی و نتایج حاصل از الگوریتم نوین در آن ارزیابی گردید. نتایج نشان داد، روش کنترل فعال ارائه‌شده قادر است کاهش چشم‌گیری در کاهش دامنه نوسان‌های سازه ایجاد نماید.

سپاسگزاری

برابر با جداول شماره (۱۳) تا (۱۵)، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از شیوه الگوریتم ژنتیک با ضرایب متغیر به‌عنوان روش برگزیده باعث کاهش قابل توجه پاسخ دینامیکی سازه می‌شود. بر این اساس، میزان بهبود سازه زیر اثر الگوی بار زلزله نورتریج در حالت کنترل شده به حالت بدون کنترل در مدل خطی برابر با ۵۵٪ و در مدل غیر خطی برابر با ۵۷٪ است. این مقادیر برای زلزله کوبه به ترتیب برابر با ۱۹٪ و ۳۲٪، همچنین برای زلزله طبس به ترتیب برابر با ۴۴٪ و ۵۹٪ خواهد بود. البته دامنه تغییر مکان‌های کمتر در مدل غیر خطی سازه نسبت به مدل خطی در برنامه متلب، به دلیل استفاده از ظرفیت غیر خطی اعضا در مدل اینپنس بوده و مستقل از الگوریتم کنترلی است.

نتیجه‌گیری

در پژوهش ارائه‌شده، یک شیوه نوین برای پایش فعال نوسان‌های سازه ارائه گردید. شیوه کنترل پیشنهادی از روش

مراجع

- [1] R. Karami-Mohammadi, M. Mirtaheri, M. Salkhordeh, E. Mosaffa, G. Mahdavi, and M. A. Hariri-Ardebili, "Seismic mitigation of substation cable connected equipment using friction pendulum systems," *Struct. eng. Mech.*, vol. 72, pp. 785-796, 2019.
- [2] H. Tzou, H.-J. Lee, and S. Arnold, "Smart materials, precision sensors/actuators, smart structures, and structronic systems," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 11, pp. 367-393, 2004.
- [3] J. N. Yang, "Instantaneous optimal control for linear, nonlinear and hysteretic structures-stable controllers," 1991.
- [4] F. Jabbari, W. Schmitendorf, and J. Yang, "H ∞ control for seismic-excited buildings with acceleration feedback," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 121, pp. 994-1002, 1995.
- [5] J. Yang and C. K. Soh, "Structural optimization by genetic algorithms with tournament selection," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 11, pp. 195-200, 1997.
- [6] J. H. Holland, "Outline for a logical theory of adaptive systems," *Journal of the ACM (JACM)*, vol. 9, pp. 297-314, 1962.
- [7] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning, Addison," *Wesley Publishing Company, Reading, MA*, vol. 1, pp. 9, 1989.
- [8] M. R. Safizadeh and I. Z. Darus, "Optimal location of sensor for active vibration control of flexible square plate," in *Information Sciences Signal Processing and their Applications (ISSPA), 2010 10th International Conference on*, pp. 393-396, 2010.
- [9] Y.-J. Cha, A. K. Agrawal, Y. Kim, and A. M. Raich, "Multi-objective genetic algorithms for cost-effective distributions of actuators and sensors in large structures," , vol. 39, pp. 7822-7833, 2012.
- [10] Y. J. Cha, A. Raich, L. Barroso, and A. Agrawal, "Optimal placement of active control devices and sensors in frame structures using multi- objective genetic algorithms," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 20, pp. 16-44, 2013.
- [11] J. Hale and A. Daraji, "Optimal placement of sensors and actuators for active vibration reduction Expert Systems with Applications of a flexible structure using a genetic algorithm based on modified Hinfinitiy," *Journal of Physics: Conference Series*, pp. 012036, 2012.
- [12] A. H. Daraji, J. M. Hale, and J. Ye, "New methodology for optimal placement of piezoelectric sensor/actuator pairs for active vibration control of flexible structures," *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 140, 2018.
- [13] X. Zhang, A. Takezawa, and Z. Kang, "Topology optimization of piezoelectric smart structures for minimum energy consumption under active control," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 58, pp. 185-199, 2018.
- [14] A. Banaei and J. Alamatian, "New genetic algorithm for structural active control by considering the effect of time delay," *Journal of Vibration and Control*, pp. 10775.46320933467, 2020.
- [15] G. R. Beddoe, and S. Petrovic, "Selecting and weighting features using a genetic algorithm in a case-based reasoning approach to personnel rostering," *European Journal of Operational Research*, vol. 175, pp. 649-671, 2006.

- [16] B. Dutta, S. D. Dao, L. Martínez, and M. Goh, "An evolutionary strategic weight manipulation approach for multi-attribute decision making: TOPSIS method," *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 129, pp. 64-83, 2021.
- [17] P. Gancarski and A. Blansche, "Darwinian, Lamarckian, and Baldwinian (Co) Evolutionary Approaches for Feature Weighting in $\$ K \$$ -means-Based Algorithms," *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 12, pp. 617-629, 2008.
- [18] J. Holland, "Book: Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology", *Control, and Artificial Intelligence*, 1975.
- [19] S. Forrest, "Genetic algorithms- Principles of natural selection applied to computation," *Science*, vol. 261, pp. 872-878, 1993.
- [20] R. Clough and J. Penzien, "Dynamics of Structures. McGraw Hill, New York., 1993.
- [21] F. Lobo, C. F. Lima and Z. Michalewicz, "Parameter setting in evolutionary algorithms," *Springer Science & Business Media*, vol. 54: 2007.
- [22] S. Mazzoni, F. McKenna, M. H. Scott, and G. L. Fenves, "OpenSees command language manual," *Pacific earthquake engineering research (PEER) center*, vol. 264, pp. 137-158, 2006.
- [23] F. C. Filippou, E. P. Popov, and V. V. Bertero, "Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints," 1983.
- [24] M. H. M. Yassin, Nonlinear analysis of prestressed concrete structures under monotonic and cyclic loads: University of California, Berkeley, 1994.
- [25] W. L. A. de Oliveira, S. De Nardin, A. L. H. de Cresce El, and M. K. El Debs, "Evaluation of passive confinement in CFT columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, pp. 487-495, 2010.

