



Control of smart non-linear base-isolated structures using optimal adaptive neural network-based PID controller

A. A. Zamani¹, S. Etedali^{2*}

¹ Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

² Department of Civil Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

ABSTRACT: This paper aims to propose an adaptive control approach for the PID controller known as ANN-OPID controller with simultaneous use of the advantages of the classical PID controller and neural networks so that it can provide better seismic performance than the optimal PID controller tuned by the teaching-learning-based optimization (TLBO) algorithm. In this approach, the structural dynamic is estimated using a neural network block and hence the parameters of the PID controller are adjusted adaptively. The seismic performance evaluation of the proposed controller is compared with the conventional optimal PID controller for an 8-story smart base-isolated structure subjected to various near-field and far-field earthquakes. Overall, the results obtained for the studied structure subjected to six earthquakes show that the TLBO-PID controller leads to a reduction of 24% and 25% in the maximum base displacement and its root mean square (RMS), an increase of 24% and 11% in the maximum acceleration and its RMS of superstructure floors and an increase of 6% and 6% in the maximum drift and its RMS of superstructure floors. However, the proposed ANN-OPID controller approach causes a reduction of 35% and 33% in the maximum base displacement and its RMS, a reduction of 9% and 7% in the maximum superstructure acceleration and its RMS, and a reduction of 5% and 6% in the maximum drift and its RMS of superstructure floors. Consequently, the proposed ANN-OPID controller can give a simultaneous reduction of the base displacement, acceleration, and drift of superstructure floors, while the TLBO-PID controller reduces the base displacement at the cost of an increase in acceleration and drift of superstructure floors.

Review History:

Received: Sep. 12, 2022

Revised: Jul. 30, 2023

Accepted: Aug. 04, 2023

Available Online: Aug. 10, 2023

Keywords:

Structural control

seismic isolation

optimal control scheme

neural network

PID controller

adaptive optimal PID controller

1- Introduction

Seismic isolation is a practical accepted method to simultaneously reduce the acceleration and relative displacement of the structure floors. However, structures equipped with seismic isolators often experience significant deformation in near-field earthquakes [1]. Equipping base-isolated structures with active and semi-active seismic control tools is an effective solution to overcome this problem [2-3].

In the field of controlling structures against earthquakes, PID controllers have been noticed by researchers as a controller with powerful structures [4-6]. However, the setting of PID controller parameters are interdependent, and changing any of these parameters can change the effect of each of these parameters; Therefore, although this controller has only three parameters, it is not easy to find the optimal values of these parameters without the need for a systematic process for the seismic control plan of structures.

Considering the complex dynamic behavior of structures and the random nature of the ground motion, the use of adaptive control structures for seismic control of structures can be a smart choice; Therefore, in this paper, a control approach using the advantages of classical PID controller and

neural networks is proposed for seismic control of structures. The proposed controller is an optimal adaptive PID controller based on a neural network known as ANN-OPID. It is implemented for an 8-story smart base-isolated structure. The seismic performance of the proposed controller in different near and far faults and earthquakes is then compared with an optimized PID controller using the TLBO algorithm named TLBO-PID.

2- The design procedure of the proposed ANN-OPID

Considering the complex seismic dynamic behavior of structures as well as the exciting many uncertainties in the nature of ground motion, using adaptive control structures can be a smart choice. The block diagram of the proposed neural network-based optimal adaptive PID controller, ANN-OPID, is shown in Figure 1. In this control strategy, the input of the PID controller block is the velocity signal of the base story of the base-isolated structure. The neural network block is used to estimate the dynamic behavior of the structure online. By using the dynamic estimation of the structural system by the neural network block, the parameters of the PID controller can be adjusted adaptively.

*Corresponding author's email: etedali@birjandut.ac.ir



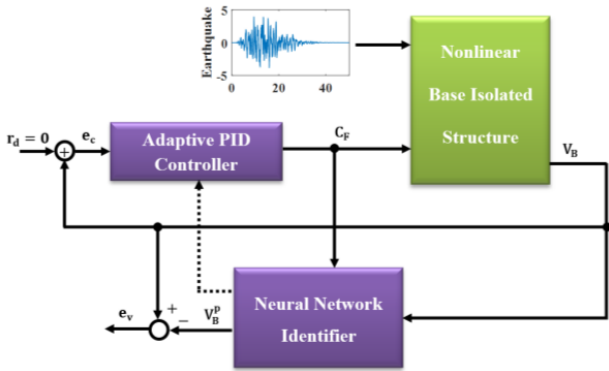


Fig. 1. Block diagram of the implementation of ANN-OPID controller

3- Results and Discussion

Numerical studies have been carried out on an 8-story base-isolated structure. The time responses of the structure in three states: uncontrolled, controlled with the TLBO-PID controller, and controlled with the proposed ANN-OPID controller were analyzed under the records of six earthquakes including Duzce, Kocaeli, El Centro, Hachinohe, Kobe, and Northridge.

For a comparison of the performance of the two controllers, during the earthquake time, the time history of the base displacement and the acceleration of the top floor during the Hachinohe earthquake as a far-field earthquake is shown in Figure 2. Similarly, the time history of base displacement and top floor acceleration during the Northridge earthquake as a near-field earthquake is shown in Figure 3.

It can be seen that although both controllers have a good performance in reducing the displacement of the isolator level in near-field and far-field earthquakes, the ANN-OPID controller shows better performance in this regard.

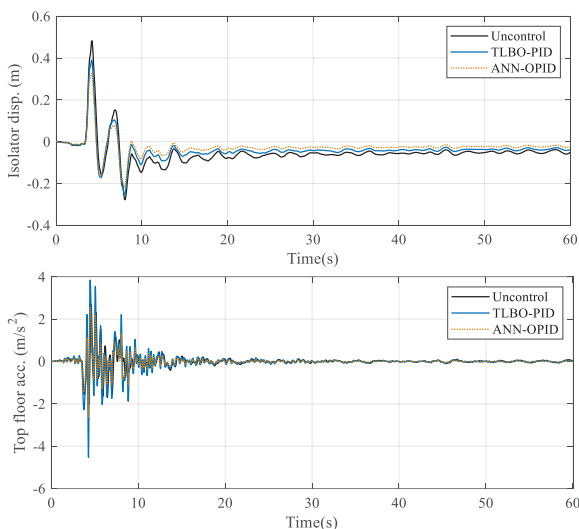


Fig. 3. Comparison of the time history of a) base displacement and b) roof acceleration under the Northridge earthquake record

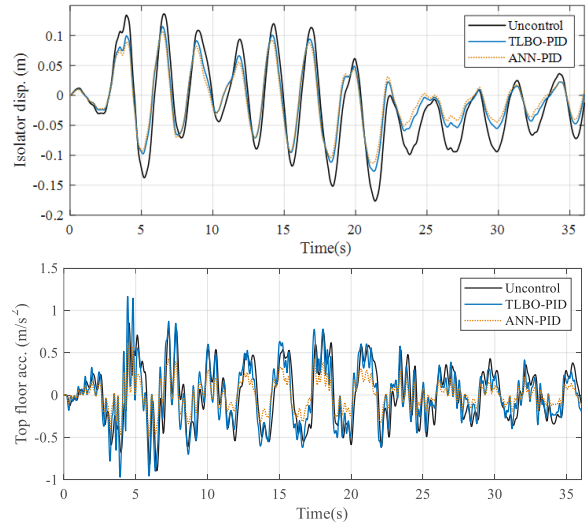


Fig. 2. Comparison of the time history of a) base displacement and b) roof acceleration under the Hachinohe earthquake record

4- Conclusions

To simultaneously use the advantages of classical PID controllers and neural networks, an adaptive control approach called ANN-OPID was proposed for use in smart base-isolated structures. In this approach, the dynamics of the structural system were estimated by the neural network block, and the PID controller parameters are adjusted accordingly. To evaluate the seismic performance of the proposed control approach in comparison with the TLBO-PID controller, an 8-story structure equipped with nonlinear isolators was simulated. The studied structure was subjected to six different near-field and far-field earthquakes. The results show that the TLBO-PID controller has led to a 24% and 25% reduction in the maximum displacement of the base story and its RMS, while this controller has caused a 24% and 11% increase in the maximum acceleration of the superstructure, and an increase of 6% and 6% in the maximum drift and its RMS of superstructure floors. The proposed ANN-OPID controller approach has reduced the maximum displacement of the base story and its RMS by 35% and 33% and 9% and 7% in the maximum acceleration of the superstructure floors and their RMS. It has also caused a reduction of 5% and 6% in the maximum relative displacement of the floors and its RMS; Therefore, while the reduction of the displacement of the isolator level as a result of using the TLBO-PID controller has been achieved at the expense of increasing the acceleration and relative displacement of the floors, the proposed ANN-OPID controller further reduces the displacement of the isolator level, and it has also reduced the acceleration and relative displacement of the floors.

References

- [1] F. Naeim, J.M. Kelly, Design of seismic isolated structures: from theory to practice, John Wiley & Sons, (1999).
- [2] H.J. Lee, G. Yang, H.J. Jung, B.F. Spencer, I.W. Lee,

- Semi-active neurocontrol of a base-isolated benchmark structure. *Structural Control and Health Monitoring*, 13(2-3) (2006) 682-692.
- [3] S. Nagarajaiah, S. Sahasrabudhe, Seismic response control of smart sliding isolated buildings using variable stiffness systems: an experimental and numerical study, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35(2) (2006) 177-197.
- [4] R. Guclu, Sliding mode and PID control of a structural system against earthquake. *Mathematical and Computer Modelling*, 44(1-2) (2006) 210-217.
- [5] S. Etedali, S. Tavakoli, M.R. Sohrabi, Design of a decoupled PID controller via MOCS for seismic control of smart structures. *Earthquakes and Structures*, 10(5) (2016) 1067-1087.
- [6] A.A. Zamani, S. Tavakoli, S. Etedali, Control of piezoelectric friction dampers in smart base-isolated structures using self-tuning and adaptive fuzzy proportional-derivative controllers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(10) (2017) 1287-1302.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. A. Zamani , S. Etedali , *Control of smart non-linear base-isolated structures using optimal adaptive neural network-based PID controller* , *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(8) (2023) 353-356.

DOI: [10.22060/ceej.2023.21765.7819](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21765.7819)





کنترل سازه‌های جدانشده هوشمند غیرخطی با استفاده از کنترل کننده بهینه PID تطبیقی مبتنی بر شبکه عصبی

عباسعلی زمانی^۱، صادق اعتدالی^{۲*}

۱- گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران
۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۱
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۵/۱۹

کلمات کلیدی:

کنترل سازه
جداسازی لرزه‌ای
طرح کنترل بهینه
شبکه عصبی
کنترل کننده PID
کنترل کننده بهینه PID تطبیقی

خلاصه: هدف مقاله حاضر پیشنهاد یک رهیافت کنترل تطبیقی از کنترل کننده PID موسوم به کنترل کننده ANN-OPID است به طوری که با بهره‌گیری هم‌زمان از مزیت‌های کنترل کننده کلاسیک PID و شبکه‌های عصبی قادر باشد با توجه به تغییرات نوع زلزله، نسبت به کنترل کننده بهینه PID با ضرایب ثابت، عملکرد لرزه‌ای بهتری را فراهم نماید. در این رهیافت با استفاده از تخمین دینامیک سیستم سازه‌ای به وسیله بلوک شبکه عصبی، پارامترهای کنترل کننده PID به صورت تطبیقی تنظیم می‌شود. ارزیابی عملکرد لرزه‌ای کنترل کننده پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده بهینه متداول PID برای یک سازه ۸ طبقه هوشمند جدانشده در پایه در معرض زلزله‌های مختلف نزدیک و دور از گسل مقایسه شده است. به طور میانگین، نتایج به دست آمده برای سازه مورد مطالعه در معرض شش زلزله نشان می‌دهند که کنترل کننده TLBO-PID منجر به کاهش ۲۴٪ و ۲۵٪ بیشینه جابه‌جایی تراز جداساز و جذر میانگین مربعات آن، افزایش ۲۴٪ و ۱۱٪ بیشینه شتاب و جذر میانگین مربعات آن در طبقات روسازه و افزایش ۶٪ و ۶٪ بیشینه جابه‌جایی نسبی و جذر میانگین مربعات آن در طبقات روسازه شده است. باین حال رهیافت کنترل کننده پیشنهادی ANN-OPID سبب کاهش ۳۵٪ و ۳۳٪ بیشینه جابه‌جایی تراز جداساز و جذر میانگین مربعات آن، کاهش ۹٪ و ۷٪ بیشینه شتاب و جذر میانگین مربعات آن در طبقات روسازه و کاهش ۵٪ و ۶٪ بیشینه جابه‌جایی نسبی و جذر میانگین مربعات آن در طبقات روسازه شده است؛ بنابراین کنترل کننده پیشنهادی ANN-OPID ضمن کاهش چشمگیر جابه‌جایی تراز جداساز، شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات روسازه را نیز کاهش می‌دهد، در حالی که که کاهش جابه‌جایی تراز جداساز در نتیجه بهره‌گیری از کنترل کننده TLBO-PID به هزینه افزایش شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات روسازه حاصل می‌شود.

۱- مقدمه

این مسئله خطر برخورد سازه جدانشده با سازه‌های مجاور، کمانش جداسازها را افزایش می‌دهد [۱]. براین اساس آئین‌نامه‌های لرزه‌ای مختلف، استفاده از ابزارهای میرایی الحاقی غیرفعال را پیشنهاد می‌کنند. مطالعات انجام شده بر روی این ابزارها نشان می‌دهند که اگرچه با اضافه نمودن آن‌ها، جابه‌جایی جداساز در زلزله‌های بزرگ کاهش می‌یابد، اما تغییر شکل‌های داخلی و شتاب مطلق طبقات روسازی افزایش می‌یابند که این مسئله منجر به ازدست‌رفتن بسیاری از امتیازات جداسازها می‌شود. بعلاوه در زلزله‌های ضعیف یا متوسط که جداسازها به خوبی عملکرد خود را انجام می‌دهند، اثرات نامطلوب ناشی از به کارگیری این ابزار در فاصله گرفتن از عملکرد ایده‌آل جداسازها گزارش شده است [۲]. تجهیز سازه‌های جدانشده پایه به ابزارهای کنترل لرزه‌ای فعال و نیمه‌فعال به عنوان راه‌حل مؤثر برای برون‌رفت از این مشکل است. به چنین سازه‌هایی سازه‌های جدانشده هوشمند اطلاق می‌شود. یک محرک اغلب در

جداسازی لرزه‌ای سازه‌ها و پل‌ها به عنوان روشی مؤثر برای کاهش خرابی‌های ناشی از وقوع زلزله‌ها و بادهای شدید مورد پذیرش قرار گرفته‌اند. جداسازهای لرزه‌ای از طریق تغییر شکل‌های بزرگی که در تراز جداسازی به وجود می‌آورند، فرکانس طبیعی سازه را به فرکانس‌هایی دور از محدوده فرکانس‌هایی که در آن انرژی زلزله متمرکز است، انتقال می‌دهند و بدین ترتیب پاسخ لرزه‌ای سازه را به طور چشمگیری کاهش می‌دهند. جداسازی لرزه‌ای یک روش پذیرفته شده عملی برای کاهش هم‌زمان شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات سازه است. باین حال، سازه‌های مجهز به جداسازهای لرزه‌ای اغلب تغییر شکل قابل توجهی را در زمین لرزه‌های حوزه نزدیک تجربه می‌کنند که ممکن است عناصر سازه‌ای و تجهیزات حیاتی سازه‌ها را به خطر بیندازد.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: etedali@birjandut.ac.ir



طبقه پایه قرار دارد و نیروی کنترلی به طبقه پایه اعمال می‌کند. به تعدادی حس‌گر برای اندازه‌گیری پاسخ لرزه‌ای سازه و یک الگوریتم کنترل برای تنظیم نیروی کنترلی نیاز است. عملکرد سازه‌های جداسده هوشمند به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر عملکرد کنترل کننده اتخاذ شده است [۳-۵].

در حوزه کنترل سازه‌ها در برابر زلزله، کنترل کننده‌های PID^۱ به‌عنوان یک کنترل کننده با ساختار ساده، توانمند و صنعتی مورد توجه محققان قرار گرفته است. با این حال تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID به یکدیگر وابسته‌اند و تغییر هر کدام از این پارامترها می‌تواند اثر هر یک از این پارامترها را تغییر دهد؛ بنابراین اگرچه این کنترل کننده، تنها سه پارامتر دارد، اما پیدا نمودن مقادیر بهینه این پارامترها بدون نیاز به یک فرآیند سامانمند برای طرح کنترل لرزه‌ای سازه‌ها آسان نیست. گوسلو [۶] عملکرد کنترل کننده PID را با کنترل کننده مود لغزشی برای سازه‌های در معرض زلزله مقایسه نمود. آگویری و همکاران [۷] یک کنترل کننده PD را برای کنترل لرزه‌ای سازه‌های مجهز به میراگرهای مغناطیسی ارائه دادند. آن‌ها نشان دادند که رهیافت کنترلی پیشنهادی ضمن سادگی نسبت به روش‌های پیچیده نظیر کنترل مود لغزشی، تئوری فیدبک کمی و کنترل پس گام عملکرد مناسبی را در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای فراهم می‌آورد. نیجدلی و بوداروقلو [۸] یک کنترل کننده PID را برای کنترل لرزه‌ای سازه‌های سه‌بعدی پیش‌سختی مجهز به کابل‌های فعال توسعه دادند و دریافتند که رهیافت پیشنهادی به‌طور قابل توجهی در کاهش حداکثر پاسخ در جهت‌های انتقالی و چرخشی و به دست آوردن پاسخ حالت پایدار مؤثر است. نیجدلی [۹] اثر بازخورد کنترل کننده PID را برای کنترل فعال سازه‌ها در معرض زلزله مطالعه نمود و نتیجه گرفت که کنترل بازخورد شتاب بهترین روش برای کارایی و پایداری سیستم کنترل کننده PID است. اعتدالی و همکاران [۱۰] یک کنترل کننده غیر درگیر را برای کنترل لرزه‌ای سازه‌های هوشمند توسعه دادند. استراتژی پیشنهاد شده ضمن داشتن مزیت سادگی در تنظیم نیروهای کنترلی، تعداد حسگرهای سیستم کنترل را به تعداد طبقات کنترل شده کاهش می‌دهد. اریفسن و همکاران [۱۱] یک کنترل کننده PID تنظیم شده با الگوریتم بهینه‌سازی زنبورعسل را برای یک سازه دو درجه آزاد مجهز به سیستم کنترل فعال پیاده کردند. آن‌ها پاسخ‌های تجربی سیستم را به‌صورت گرافیکی ارائه دادند و نشان دادند جابه‌جایی‌ها و شتاب‌های طبقات به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. یک روش کنترل فضای مودی مستقل با ترکیب کنترل کننده PID برای کنترل لرزه‌ای سازه‌ها در [۱۲] پیشنهاد شد. کنترل کننده پیشنهادی از

نظر سادگی و کاهش حسگرهای مورد نیاز به تعداد طبقه‌های کنترل شده دارای مزایای متعددی است. علاوه بر این، ارزیابی مقاوم‌بودن در برابر عدم قطعیت‌های سختی سازه تأیید گردید. شاهی و همکاران [۱۳] اثرپذیری دو کنترل کننده PID و LQR^۲ را برای کنترل لرزه‌ای سازه‌های بلند در معرض زلزله را با در نظر گرفتن اثرات SSI^۳ ارزیابی نمودند. کنترل کننده‌های اتخاذ شده به‌طور قابل توجهی قادر به کاهش بیشینه جابه‌جایی طبقات بالای ساختمان بلند مورد مطالعه بودند. کنترل کننده PID یک استراتژی ساده با متغیرهای طراحی بسیار کمتر با عملکرد لرزه‌ای بهتر نسبت کنترل کننده LQR ارائه می‌دهد. نتایج نشان داد که عملکرد کنترل کننده‌ها با افزایش نرمی خاک کاهش می‌یابد، به طوری که نادیده گرفتن اثرات SSI ممکن است منجر به نتایج نادرست و غیرواقعی از رفتار لرزه‌ای سازه‌ها شود. پالیزوان‌زند و همکاران [۱۴] یک رهیافت برای پیاده‌سازی کنترل کننده PID جهت کاهش ارتعاش سازه‌های ساختمانی معرفی کرد. آن‌ها دریافتند که کنترل کننده پیشنهادی می‌تواند حداکثر جابه‌جایی، سرعت و شتاب سازه را که در معرض زمین‌لرزه‌های دور از گسل قرار می‌گیرد، کاهش دهد.

پیاده‌سازی کنترل کننده PID و خانواده آن برای کنترل لرزه‌ای سازه‌های جداسده هوشمند در پایه مورد توجه قرار گرفته است. اعتدالی و همکاران [۱۵] طرح بهینه کنترل کننده‌های PD و PID را برای کنترل نیروی اصطکاکی میراگرهای اصطکاکی پیزوالکتریک در سازه‌های جداسده هوشمند را ارائه دادند و عملکرد لرزه‌ای مناسب آن را در زلزله‌های مختلف و با ارزیابی شاخص‌های عملکردی مختلف نشان دادند. اعتدالی [۱۶] حساسیت کنترل کننده PID پیاده‌سازی شده در یک سازه جداسده هوشمند را در برابر عدم قطعیت‌های مدل، جداساز و زلزله مطالعه کرد. نتایج نشان می‌دهد که کنترل کننده PID در برابر عدم قطعیت‌های تا $\pm 15\%$ درصد در ضرایب میرایی و سختی روسازه، نیروی تسلیم جداساز و زلزله مصنوعی مقاوم است. عدم قطعیت 20% - در ضریب سختی و نسبت سختی LRB باعث افزایش ۱۵ درصدی بیشینه و جذر میانگین مربعات پاسخ‌های روسازه می‌شود. در تأخیرهای زمانی زیاد، شاخص عملکرد برای انرژی ورودی لرزه‌ای به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، درحالی‌که حداکثر آسیب و انرژی میرایی به ترتیب تا ۵ و ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. باهدف بهبود و افزایش اثرپذیری و کارایی کنترل کننده PID، طرح کنترل کننده تطبیقی فازی مرتبه کسری PID برای کنترل لرزه‌ای سازه‌های جداسده مجهز به میراگرهای MR و میراگرهای اصطکاکی پیزوالکتریک پیاده‌سازی شد [۱۷-۱۹]. نتایج مطالعات

2 Linear-quadratic-Gaussian

3 Soil-structure interaction

1 Proportional-integral-derivative

بخش دوم، نحوه مدل‌سازی سازه جداشده هوشمند تبیین شده است. بخش سوم به تشریح الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری می‌پردازد. کنترل‌کننده بهینه PID مبتنی بر الگوریتم TLBO در بخش چهارم آورده شده است. در بخش پنجم، رهیافت کنترل‌کننده موسوم به کنترل‌کننده PID تطبیقی بهینه مبتنی بر شبکه عصبی موسوم به ANN-OPID^۵ و نحوه پیاده‌سازی آن برای کنترل لرزه‌ای سازه‌ها پیشنهاد شده است. کارایی و اثرگذاری رهیافت کنترلی پیشنهادی در مقایسه با کنترل‌کننده بهینه متداول PID برای یک سازه ۸ طبقه هوشمند جداشده در پایه در بخش ششم ارزیابی می‌گردند. در بخش انتهایی، نتایج کلی حاصل از مطالعه حاضر جمع‌بندی می‌شوند.

۲- مدل سازه جداشده هوشمند

سازه مورد مطالعه یک سازه جداشده هوشمند است که تحت شتاب زمین $\ddot{X}_g(t)$ قرار می‌گیرد. با در نظر گرفتن یک درجه آزادی برای طبقه پایه و n درجه آزادی برای روسازه، مدل ریاضی حرکت سازه جداشده از پایه مجهز به یک سیستم کنترل فعال واقع در طبقه پایه، به شرح معادله زیر است:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) + \Delta\mathbf{f}(t) = \mathbf{D}\mathbf{C}_F(t) - \mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{\mathbf{x}}_g(t) \quad (1)$$

که در آن \mathbf{M} ، \mathbf{C} و \mathbf{K} به ترتیب به ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی کل سازه (شامل طبقه پایه و طبقات روسازه) با ابعاد $(n+1) \times (n+1)$ اشاره دارند. همچنین $\mathbf{x}(t)$ ، $\dot{\mathbf{x}}(t)$ و $\ddot{\mathbf{x}}(t)$ به ترتیب بردارهای $1 \times (n+1)$ بعدی مربوط به جابه‌جایی، سرعت و شتاب طبقات پایه و روبرنا نسبت به زمین است. بردار $\mathbf{r} = [1 \dots 1]^T$ در حقیقت بردار مکان $1 \times (n+1)$ بعدی مربوط به شتاب زمین است. $\ddot{\mathbf{E}}$ به بردار مکان $1 \times (n+1)$ بعدی سیستم جداساز اشاره دارد و $\mathbf{f}(t)$ نیروی بازگرداننده سیستم جداساز است. علاوه بر این، \mathbf{D} ماتریس $1 \times (n+1)$ بعدی نشان‌دهنده محل اعمال نیروی کنترلی و $\mathbf{C}_F(t)$ نیروی کنترلی اعمالی به وسیله راهبرد کنترلی است.

رفتار غیرخطی جداساز LRB^۶ را می‌توان با یک مدل دوخطی مدل کرد، اما این مدل پاسخ‌های شتاب سازه را بیش‌ازحد تخمین می‌زند. برای غلبه بر این مسئله، می‌توان از مدل بوک-ون استفاده کرده که تطابق بیشتری را

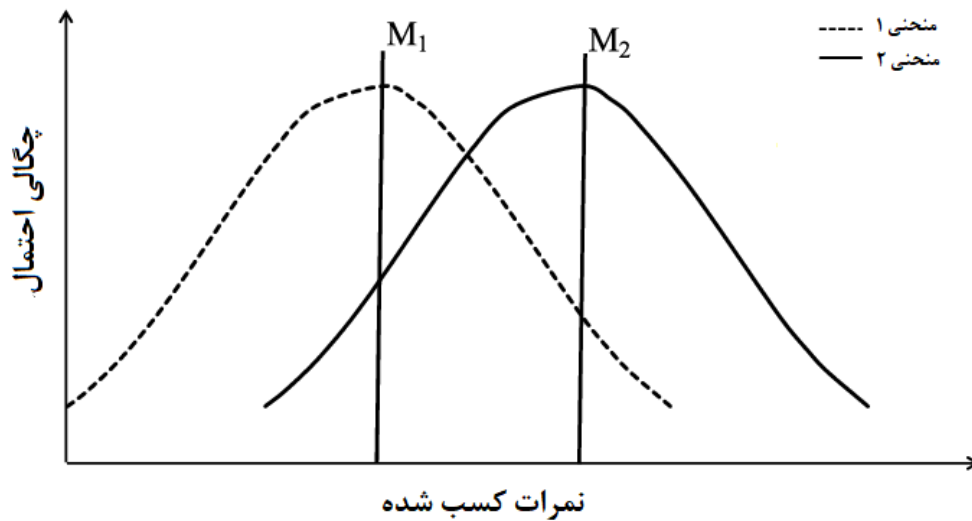
اخیر حاکی از عملکرد لرزه‌ای مناسب‌تر طرح‌های کنترل‌کننده تطبیقی فازی مرتبه کسری PID نسبت به کنترل‌کننده فازی یا کنترل‌کننده معمول PID است.

رهیافت کنترل‌کننده‌های PID مبتنی بر شبکه عصبی تابع پایه شعاعی RBF^۱ موسوم به RBF-PID^۲ عملکرد بهتری در مقایسه با یک کنترل‌کننده سنتی PID برای کاربردهای مهندسی مختلف دارد. ما و همکاران [۲۰] یک کارایی یک کنترل‌کننده RBF-PID را در سامانه‌های مگ لو مربوط به سیستم حمل‌ونقل ریلی بررسی کردند. آن‌ها از طریق شبیه‌سازی و آزمایش به این نتیجه رسیدند که در مقایسه با روش سنتی کنترل PID، روش RBF-PID می‌تواند عملکرد کنترل سیستم را بهبود بخشد. ژونگ و همکاران [۲۱] یک الگوریتم کنترل هوشمند بهبودیافته برای تنظیم‌کننده‌های فشار گاز الکتریکی بر اساس بهینه‌سازی ازدحام ذرات، شبکه عصبی RBF و کنترل‌کننده PID ایجاد پیاده‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که الگوریتم پیشنهادی زمان پاسخ گام را ساده می‌کند و عملکرد کاوش را بهبود می‌بخشد.

نظر به رفتار دینامیکی پیچیده سازه‌ها و ماهیت تصادفی حرکت زمین، استفاده از ساختارهای کنترلی تطبیقی برای به‌کارگیری در کنترل لرزه‌ای سازه‌ها در معرض زلزله می‌تواند انتخاب هوشمندانه‌ای باشد؛ لذا در مقاله حاضر یک رهیافت کنترلی با بهره‌گیری هم‌زمان از مزیت‌های کنترل‌کننده کلاسیک PID و شبکه‌های عصبی برای کنترل لرزه‌ای سازه‌های در معرض زلزله پیشنهاد شده است. کنترل‌کننده پیشنهادی به‌طور هم‌زمان از یک بلوک کنترل‌کننده PID با سیگنال ورودی از سرعت جداساز و یک بلوک شبکه عصبی برای تخمین برخط رفتار دینامیکی سازه بهره می‌برد، لذا با استفاده از تخمین دینامیک سیستم سازه‌ای به‌وسیله بلوک شبکه عصبی می‌توان پارامترهای کنترل‌کننده PID را به‌صورت تطبیقی تنظیم نمود. کنترل‌کننده پیشنهادی موسوم به کنترل‌کننده PID تطبیقی بهینه مبتنی بر شبکه عصبی موسوم به ANN-OPID^۳ برای یک سازه ۸ طبقه هوشمند جداشده در پایه پیاده‌سازی و عملکرد لرزه‌ای آن در زلزله‌های مختلف نزدیک و دور از گسل و در مقایسه با یک کنترل‌کننده بهینه PID تنظیم‌شده با استفاده از الگوریتم TLBO^۴ مقایسه شده است.

بخش‌های بعدی مقاله حاضر به شرح زیر ساماندهی شده است: در

- 1 Radial basis function
- 2 Radial basis function proportional-integral-derivative
- 3 Artificial neural network optimal proportional-integral-derivative
- 4 Teaching learning-based optimization



شکل ۱. یک نمونه مدل برای توزیع نمرات به دست آمده برای گروهی از فراگیران [۲۳].

Fig. 1. An example model for the distribution of scores obtained for a group of learners [23]

۳- الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری

رائو در سال ۲۰۱۱ الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری را بر اساس تأثیر معلم بر عملکرد فراگیران در کلاس ارائه داد. این الگوریتم شامل دو فاز اصلی است که عبارتند از: فاز معلم^۱ و مرحله یادگیرنده^۲. مرحله اصلی اول بانام فاز معلم به وقوع فرآیند یادگیری به واسطه نقش معلم اشاره دارد. مرحله اصلی دوم بانام فاز یادگیرنده به وقوع یادگیری در نتیجه تعامل بین فراگیران می‌پردازد. شرح این دو مرحله در ادامه بیان شده است [۲۳]:

$$\text{Difference_Mean}_i = r_i (M_{\text{new}} - T_F M_i) \quad (4)$$

۳-۱- فاز معلم

همان‌طور که می‌دانیم یک معلم خوب می‌تواند میانگین نمرات به دست آمده توسط فراگیران را از M_A به M_B همانند شکل ۱ بهبود دهد. میانگین نمره یک کلاس می‌تواند توسط یک معلم تا حدودی ارتقا پیدا کند، به طوری که میزان ارتقا به توانایی کلی اعضای کلاس بستگی دارد. اگر مقدار میانگین نمره در تکرار i با M_i و معلم در این تکرار با T_i نشان داده شود، در فاز معلم، T_i سعی می‌کند مقدار میانگین M_i را به سطح

با نتایج تجربی فراهم می‌کند. نیروی باز یابی هیسترتیک سیستم جداساز در مدل بوک-ون را می‌توان به صورت معادله زیر به دست آورد [۲۲]:

$$f(t) = (1 - k_{\text{yield}} / k_{\text{initial}}) Q_y z_b + k_b x_b(t) + c_b \dot{x}_b(t) \quad (2)$$

که در آن نیروی تسلیم جداساز است. همچنین k_{initial} و k_{yield} نشان‌دهنده سختی برشی پس از تسلیم و اولیه هستند. k_b میانگین سختی خطی شده حلقه غیرخطی نیرو-جاب‌جایی LRB و c_b ضریب میرایی LRB است. $x_b(t)$ و $\dot{x}_b(t)$ به ترتیب به جاب‌جایی نسبی و سرعت طبقه جداساز است. در معادله (۲)، Z_b یک متغیر تکاملی است که می‌تواند با معادله دیفرانسیل زیر به دست آید:

$$\dot{z}_b = A_b \dot{x}_1 - \gamma z_b \left| \dot{x}_1 \right| \left| z_b \right|^{n_b-1} - \beta \dot{x}_1 \left| z_b \right|^{n_b} \quad (3)$$

که در آن $n_b = 1$ و $A_b = 2\gamma = 2\beta = k_{\text{initial}} / Q_y$ پارامترهای شکل حلقه پسماند می‌باشند [۲۲].

1 Teacher Phase
2 Learner Phase

کار چالش برانگیز است. برای کنترل فعال یک سازه جداشده در پایه، کاهش جابه‌جایی بزرگ جداساز در زلزله‌های حوزه نزدیک به‌عنوان چالش پیشروی طراحان است، لیکن هرگونه تلاش برای نیل به این هدف ممکن است سبب افزایش شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات روسازه شود. علاوه بر این تغییرات ناگهانی در نیروی کنترل اعمالی به سازه می‌تواند منجر به افزایش شتاب طبقات روبنا شود؛ بنابراین طرح کنترلی مناسب برای کاهش جابه‌جایی جداساز بدون افزایش قابل توجه در شتاب طبقات روبنا در هنگام تحریکات زلزله‌های می‌بایستی هدف‌گذاری شود. باتوجه به چالش‌های مطرح‌شده، طراحی کنترل‌کننده PID باهدف تعیین ضرایب بهینه تناسبی، انتگرالی و مشتقی آن می‌تواند به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی دیده شود. برای حل یک مسئله بهینه‌سازی با اهداف طراحی متضاد، یک راه‌حل مؤثر استفاده از یک الگوریتم فرااکتشافی است. به‌منظور طراحی کنترل‌کننده TLBO-PID^۱ برای به‌دست‌آوردن یک مصالحه خوب بین جابه‌جایی جداسازی و شتاب روبنا با استفاده از کنترل‌کننده PID، مسئله طراحی با در نظر گرفتن بردار طراحی $\chi_d^{TLBO-PID} = [K_p K_i K_D]^T$ و توابع هدف روابط زیر برای تنظیم تعریف شده است:

$$G_1(\chi_d^{TLBO-PID}) = \frac{\max_t \|x_b(t)\|}{\max_t \|x_b(t)\|} \quad (7)$$

$$G_2(\chi_d^{TLBO-PID}) = \frac{\max_{t,f} \|\tilde{a}_f(t)\|}{\max_{t,f} \|\hat{a}_f(t)\|}; f = 1, \dots, N \quad (8)$$

تابع هدف $G_1(\chi_d^{TLBO-PID})$ نسبت بیشینه جابه‌جایی جداساز در سازه جداشده هوشمند به مقدار متناظر آن در سازه جداشده (کنترل نشده) است. همچنین تابع هدف $G_2(\chi_d^{TLBO-PID})$ نشان‌دهنده بیشینه شتاب طبقات روبنا در سازه کنترل‌شده نرمالیزه شده به مقدار متناظر آن در سازه جداشده (کنترل نشده) است. هدف کمینه کردن تابع هدف $G_M(\chi_d^{TLBO-PID})$ در معادله (۹) با در نظر گرفتن قید $L_b \leq \chi_d^{TLBO-PID} \leq U_b$ است. منظور از L_b و U_b محدودیت‌هایی است که به مرزهای پایین و بالایی پارامترهای کنترل‌کننده PID اشاره دارد و در شبیه‌سازی‌ها به صورت

خودش افزایش دهد، به طوری که اگر میانگین جدید با M_{new} نشان داده شود، می‌توان راه‌حل را با استفاده از معادله زیر، بسته به تفاوت بین میانگین موجود و میانگین جدید، به‌روزرسانی نمود [۲۳].

$$X_{new,i} = X_{old,i} + \text{Difference_Mean}_i \quad (5)$$

در این معادله منظور از T_F فاکتور آموزش است که سعی در تغییر مقدار میانگین دارد که مقدار عددی آن ۱ یا ۲ تنظیم می‌شود. لازم به ذکر است که T_i یک عدد تصادفی در بازه $[0,1]$ است. برای اصلاح راه‌حل موجود از معادله زیر بهره برده می‌شود [۲۳].

۳-۲ فاز یادگیرنده

همان‌طور که در فرایند آموزش اشاره شد، ارتقای فراگیران در فرآیند یادگیری به دو صورت یادگیری از معلم و تعامل بین فراگیران انجام می‌شود. روش‌هایی همچون بحث، ارائه، ارتباطات رسمی و غیره باعث تعامل بین فراگیران می‌شود. به‌نوعی می‌توان بیان کرد که زمانی که یک یادگیرنده آگاه، اطلاعات بیشتری در مورد موضوع خاصی ارائه می‌دهد، یادگیرنده می‌تواند چیزهای جدیدی بیاموزد. شبه کد بیان‌شده در ادامه اصلاح یادگیرنده برای تعداد جمعیت nPop را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد [۲۳]:

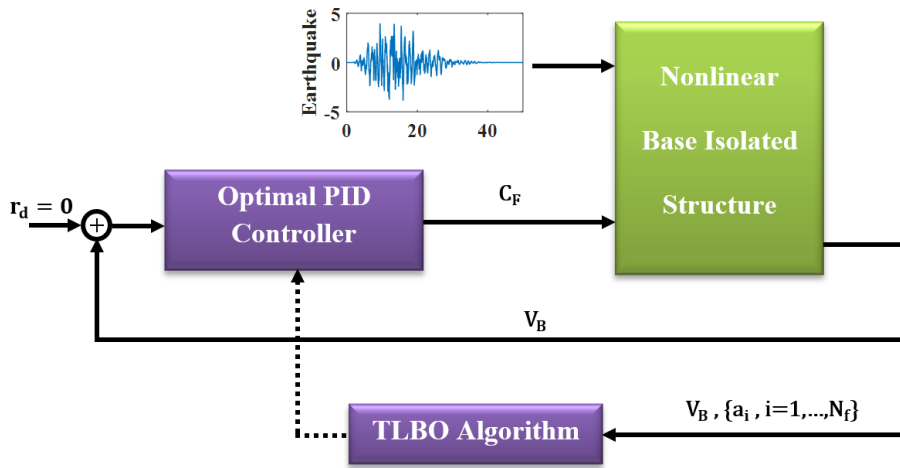
```

For i = 1 : nPop
Randomly select two learners Xi and Xj
where i ≠ j
If f(Xi) < f(Xj)
    Xnew,i = Xold,i + ri(Xi - Xj)
Else
    Xnew,i = Xold,i + ri(Xj - Xi)
End If
End For
Accept Xnew if it gives a better function value.
    
```

۴- کنترل‌کننده بهینه PID مبتنی بر الگوریتم TLBO

در مبحث کنترل لرزه‌ای سازه‌ها، اثربخشی استفاده از یک کنترل‌کننده PID اساساً به مقادیر ضرایب تناسبی، انتگرالی و مشتقی آن بستگی دارد. باتوجه به عدم قطعیت موجود در رفتار و محتوای فرکانسی زلزله‌های مختلف و رفتار سیستم سازه‌ای مورد مطالعه، تعیین پارامترهای کنترل‌کننده PID یک

1 Teaching learning-based optimization proportional-integral-derivative



شکل ۲. بلوک دیاگرام طراحی کنترل کننده بهینه PID-TLBO.

Fig. 2. Block diagram of the design of the optimal TLBO-PID controller

تکرار ۱۰۰ برای یافتن بهترین تنظیم از کنترل کننده PID استفاده شده است. زمان اجرای شبیه سازی ۵۰ ثانیه بوده و بلوک دیاگرام طراحی کنترل کننده بهینه PID مبتنی بر الگوریتم TLBO یا به اختصار TLBO-PID در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$U_b = [2000 \quad 2000 \quad 2000]^T \quad \text{و} \quad L_b = [0 \quad 0 \quad 0]^T$$

انتخاب شده است.

$$G_M(\chi_d^{\text{TLBO-PID}}) = C_1 G_1(\chi_d^{\text{TLBO-PID}}) + C_2 G_2(\chi_d^{\text{TLBO-PID}}) \quad (9)$$

۵- کنترل کننده PID تطبیقی بهینه مبتنی بر شبکه عصبی

با توجه به رفتار دینامیک لرزه‌ای پیچیده سازه‌ها و همچنین عدم قطعیت‌های زیادی که در ماهیت حرکت زمین وجود دارد، استفاده از ساختارهای کنترلی تطبیقی می‌تواند انتخاب هوشمندانه‌ای باشد. بلوک دیاگرام کنترل کننده پیشنهادی PID تطبیقی بهینه مبتنی بر شبکه عصبی، ANN-OPID، در شکل ۳ نشان داده شده است. در این راهبرد کنترلی، ورودی بلوک کنترل کننده PID سیگنال سرعت جداساز است. بلوک شبکه عصبی برای تخمین برخط رفتار دینامیکی سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از تخمین دینامیک سیستم سازه‌ای به وسیله بلوک شبکه عصبی، می‌توان پارامترهای کنترل کننده PID را به صورت تطبیقی تنظیم نمود.

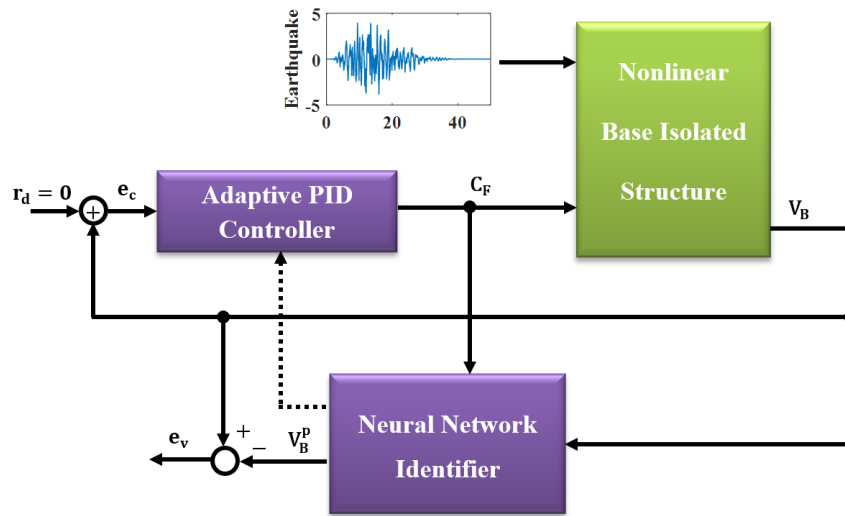
بلوک شبکه عصبی به صورت یک شبکه عصبی RBF در نظر گرفته شده است. شبکه عصبی RBF در مقایسه با سایر ساختارهای شبکه‌های عصبی دارای مزایایی همچون طراحی آسان به واسطه ساختار سه لایه‌ای، روند آموزش سریع‌تر و عملکرد مقاوم‌تر در برخورد با داده‌های نویزی بوده [۲۵-۲۷]، لذا در این بخش از شبکه عصبی RBF در ساختار کنترلی ANN-OPID استفاده شده است. این شبکه عصبی دارای چهار ورودی و یک

چون هدف اصلی کمینه کردن بیشینه جابه‌جایی تراز جداساز بدون افزایش قابل توجه در شتاب طبقات روینا است، بنابراین مقادیر ضرایب $C_1 = C_2 / 2 = 1$ در نظر گرفته شده است.

یک شتاب مصنوعی زلزله در فرآیند طراحی کنترل کننده به سازه اعمال شده است. این شتاب مصنوعی، با اعمال نویز سفید گاوسی به یک شکل اصلاح شده از فیلتر کانای-تاجیمی طبق معادله (۱۰) تولید می‌شود [۲۴]:

$$\Lambda(s) = \frac{4\xi_g \omega_g s}{s^2 + 2\xi_g \omega_g s + \omega_g^2} \quad (10)$$

که در آن منظور از ξ_g نسبت میرایی زمین است که مقدار آن $0/3$ در نظر گرفته شده است. همچنین ω_g فرکانس زمین و برابر که $2\pi \text{ rad/s}$ در نظر گرفته شده است [۲۴]. الگوریتم TLBO با تعداد جمعیت $nPop = 10$ و بیشینه



شکل ۳. بلوک دیاگرام پیاده‌سازی کنترل‌کننده ANN-OPID.

Fig. 3. Block diagram of the implementation of ANN-OPID controller.

گرفتن تابع هزینه زیر به دست آورد:

$$E_c(k) = \frac{1}{2} [r_d(k) - V_B(k)]^2 = \frac{1}{2} e_c(k)^2 \quad (13)$$

در این معادله e_c و r_d نشان‌دهنده مقدار خطا و مقدار مرجع سرعت جداساز است که صفر در نظر گرفته شده است. با استفاده از روش گرادیان نزولی مطابق روابط زیر، می‌توان مقدار تابع E_c را برحسب متغیرهای K_p ، K_D و K_I کمینه کرد.

$$\Delta K_p = -\eta_p \frac{\partial E_c}{\partial K_p} = -\eta_p \frac{\partial E_c}{\partial V_B} \frac{\partial V_B}{\partial \Delta C_F} \frac{\partial \Delta C_F}{\partial K_p} = \eta_p e_c(k) \frac{\partial V_B}{\partial \Delta C_F} [e_c(k) - e_c(k-1)] \quad (14)$$

$$\Delta K_I = -\eta_I \frac{\partial E_c}{\partial K_I} = -\eta_I \frac{\partial E_c}{\partial V_B} \frac{\partial V_B}{\partial \Delta C_F} \frac{\partial \Delta C_F}{\partial K_I} = \eta_I e_c(k) \frac{\partial V_B}{\partial \Delta C_F} e_c(k) \quad (15)$$

خروجی است. خروجی این شبکه، مقدار تخمین زده شده سرعت جداساز، V_B^P ، بوده و ورودی‌های شبکه عصبی مطابق معادلات زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} I_1(k) &= \Delta C_F(k), \\ I_2(k) &= V_B(k), \\ I_3(k) &= V_B(k-1), \\ I_4(k) &= V_B(k-2) \end{aligned} \quad (11)$$

در این روابط، منظور از I_1 ، V_B و C_F ورودی‌های شبکه عصبی، مقدار اندازه‌گیری شده سرعت جداساز و مقدار نیروی فعال خروجی کنترل‌کننده PID می‌باشند. خروجی کنترل‌کننده PID می‌تواند به صورت معادله تفاضلی زیر نیز نشان داده شود.

$$\begin{aligned} \Delta C_F(k) &= C_F(k) - C_F(k-1) = \\ &= K_p \Delta e_c(k) + K_I e_c(k) + K_D (\Delta e_c(k) - \Delta e_c(k-1)) \end{aligned} \quad (12)$$

در این معادله K_p ، K_I و K_D به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب تناسبی، انتگرالی و مشتقی کنترل‌کننده PID می‌باشند. تنظیم برخط این سه ضریب را می‌توان با استفاده از روش پس انتشار خطا و گرادیان نزولی با در نظر

در این معادله $V_B(k)$ و $V_B^P(k)$ نشان‌دهنده مقدار خروجی واقعی و خروجی شبکه برای نمونه زمانی k ام می باشند. مقادیر w_j وزن‌های شبکه هستند و برای تنظیم آن‌ها می‌توان از روش گرادیان نزولی استفاده کرد. با اعمال این روش به‌منظور کمینه کردن تابع E_v می‌توان روابط لازم برای محاسبه برخط مقادیر وزن‌ها، مراکز و عرض‌ها که پارامترهای شبکه عصبی RBF هستند را محاسبه نمود.

$$\Delta w_j = [V_B(k) - V_B^P(k)] \varphi_j, \quad (20)$$

$$w_j(k) = w_j(k-1) + \alpha \Delta w_j + \beta [w_j(k-1) - w_j(k-2)]$$

$$\Delta c_{ji} = [V_B(k) - V_B^P(k)] w_j \frac{I_j - c_{ji}}{b_j^2}, \quad (21)$$

$$c_{ji}(k) = c_{ji}(k-1) + \alpha \Delta c_{ji} + \beta [c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)]$$

$$\Delta b_j = [V_B(k) - V_B^P(k)] w_j \varphi_j \frac{\|I_N - C_j\|}{b_j^3}, \quad (22)$$

$$b_j(k) = b_j(k-1) + \alpha \Delta b_j + \beta [b_j(k-1) - b_j(k-2)]$$

ضریب یادگیری و ضریب اینرسی در این روابط با α و β نشان‌داده شده است. هنگامی که خروجی شبکه عصبی به مقدار واقعی همگرا می‌شود، می‌توان مقدار سرعت جداساز تخمین زده شده به‌وسیله شبکه عصبی $V_B^P(k)$ را جایگزین مقدار واقعی سرعت جداساز $V_B(k)$ نمود؛ بنابراین می‌توان برای محاسبه ژاکوبین دینامیک سیستم سازه از معادله تقریبی زیر استفاده کرد.

$$\frac{\partial V_B}{\partial \Delta C_F} \approx \frac{\partial V_B^P}{\partial \Delta C_F} = \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^m w_j h_j \right)}{\partial \Delta C_F} = \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^m w_j \exp \left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2} \right) \right)}{\partial \Delta C_F} = \sum_{j=1}^m w_j h_j \frac{c_j - x_1}{b_j^2} \quad (23)$$

$$\Delta K_D = -\eta_D \frac{\partial E_c}{\partial K_D} = -\eta_D \frac{\partial E_c}{\partial V_B} \frac{\partial V_B}{\partial \Delta C_F} \frac{\partial \Delta C_F}{\partial K_D} = \eta_D e_c(k) \frac{\partial V_B}{\partial \Delta C_F} \times [e_c(k) - 2e_c(k-1) + e_c(k-2)] \quad (16)$$

در این معادلات، η_P ، η_I و η_D نرخ‌های یادگیری برای پارامترهای K_D ، K_I ، K_P می‌باشند. در این روابط نیاز به محاسبه ژاکوبین دینامیک سازه $\frac{\partial V_B}{\partial \Delta C_F}$ است که از طریق شبکه عصبی RBF مقدار آن تخمین زده می‌شود. در ساختار یک شبکه عصبی RBF تنها یک لایه پنهان وجود دارد و همچنین در ساختار آن دودسته وزن وجود دارد، یک دسته از این وزن‌ها، لایه پنهان را به لایه ورودی و دسته دیگر وزن‌ها، لایه پنهان را به لایه خروجی متصل می‌کند. لایه پنهان شامل گره‌هایی به نام توابع RBF است. وزن‌های متصل به لایه ورودی حاوی پارامترهای توابع پایه هستند. وزن‌هایی که لایه پنهان را به لایه خروجی متصل می‌کند برای تشکیل ترکیبات خطی از فعال‌سازی توابع پایه RBF جهت تولید خروجی‌های شبکه استفاده می‌کنند. در شبکه عصبی به‌کاررفته در بلوک دیاگرام طراحی بالا از توابع فعال‌ساز گوسی $\Phi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m]$ در لایه پنهان میانی مطابق معادله زیر استفاده می‌شود.

$$\varphi_j(I_N) = \exp \left(-\frac{\|I_N - C_j\|^2}{2b_j^2} \right), j=1, 2, \dots, m \quad (17)$$

در این معادله $I_N = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}^T$ نشان‌دهنده بردار لایه ورودی است. همچنین C_j و b_j به ترتیب نشان‌دهنده مقدار مرکز و عرض هر تابع گوسی در گره j -ام است. خروجی شبکه عصبی را می‌توان به‌صورت معادله (۱۸) بیان کرد. همچنین برای آموزش شبکه عصبی RBF تابع هزینه مرتبه دوم نشان داده شده در معادله (۱۹) در نظر گرفته می‌شود.

$$V_B = w_1 \varphi_1 + w_2 \varphi_2 + \dots + w_m \varphi_m \quad (18)$$

$$E_v(k) = \frac{1}{2} [V_B(k) - V_B^P(k)]^2 = \frac{1}{2} e_v(k)^2 \quad (19)$$

جدول ۱. مشخصات زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه.

Table 1. Characteristics of the studied earthquakes.

نام زلزله	ایستگاه	سال (میلادی)	کشور	شدت (ریشتر)	PGA (g)	نوع زلزله
دوزجه	دوزجه	۱۹۹۹	ترکیه	۷/۵	۰/۸۲	دور از گسل
کوچوالی	کوچوالی	۱۹۹۹	ترکیه	۷/۵	۰/۳۶	دور از گسل
ال سنتر	امپریال والی	۱۹۴۰	آمریکا	۷/۱	۰/۳۴	دور از گسل
کوبه	آژانس هواشناسی ژاپن (JMA)	۱۹۹۵	ژاپن	۷/۲	۰/۸۲	نزدیک گسل
هاچینهو	هاچینهو	۱۹۶۸	ژاپن	۷/۹	۰/۲۲	دور از گسل
نورثدریج	بیمارستان سیلمار	۱۹۹۴	آمریکا	۶/۸	۰/۸۲	نزدیک گسل

مقدار تلورانس نسبی برای دقت محاسباتی حل‌کننده برابر مقدار پیش‌فرض پیشنهادی Simulink و برابر ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است. در ابتدا طراحی کنترل‌کننده بهینه PID با ضرایب ثابت با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی TLBO و بلوک دیاگرام طراحی ارائه شده در شکل ۲ انجام شد. تابع تبدیل مربوط به کنترل‌کننده بهینه PID با ضرایب ثابت به صورت معادله زیر حاصل شد:

$$H_{TLBO-PID}(S) = 1470.43 + \frac{441.71}{S} + 142.15S \quad (24)$$

سپس با به‌کارگیری رهیافت کنترلی پیشنهاد شده برای طراحی کنترل‌کننده PID تطبیقی بهینه مبتنی بر شبکه عصبی مطابق آنچه در بخش ۵ ارائه گردید، کنترل‌کننده پیشنهادی ANN-OPID برای سازه مذکور پیاده‌سازی شد. ارزیابی عملکرد لرزه‌ای کنترل‌کننده پیشنهادی برای سازه‌های جدا شده پایه هوشمند تحت ارتعاشات لرزه‌ای مختلف، پاسخ زمانی سازه در سه حالت: کنترل نشده، کنترل شده با کنترل‌کننده TLBO-PID و کنترل شده با کنترل‌کننده پیشنهادی ANN-OPID در معرض رکورد شش زمین‌لرزه دوزجه، کوچوالی، ال سنتر، هاچینهو، کوبه و نورثدریج مورد تحلیل قرار گرفت. لازم به ذکر است که مشخصات زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ گزارش شده است [۲۸].

در جدول ۲ حداکثر پاسخ لرزه‌ای سازه جدا شده در پایه کنترل نشده و سازه جدا شده در پایه مجهز به کنترل‌کننده‌های TLBO-PID و ANN-OPID گزارش شده است. در این جدول x_b^{Peak} ، a_f^{Peak} و d_f^{Peak} به ترتیب معرف بیشینه جابه‌جایی تراز جداساز، بیشینه شتاب طبقات روسازه و بیشینه

تغییرات ضرایب کنترل‌کننده در معادلات ۱۴ تا ۱۶ با داشتن اطلاعات ژاکوبین دینامیک سازه در معادله بالا قابل محاسبه است. در شبیه‌سازی‌های کنترل لرزه‌ای در این مقاله، چهار نرون برای لایه ورودی، دوازده نرون برای لایه میانی و یک نرون برای لایه خروجی در نظر گرفته می‌شود. همچنین لازم به ذکر است که مقادیر ضرایب یادگیری $\eta_p = \eta_i = \eta_D = 0.15$ ، $\alpha = 0.5$ و $\beta = 0.5$ با در نظر گرفتن سیگنال شتاب مصنوعی زلزله و انجام چندین شبیه‌سازی با روش آزمون و خطا در نظر گرفته شده است.

۶- مطالعات عددی و ارزیابی نتایج

مطالعات عددی بر روی یک سازه ۸ طبقه جدا شده در پایه انجام شده است. جرم و ارتفاع طبقات همه طبقات روسازه برابر $m_i = 300 \text{ ton}$ و $h_i = 3/m^2$ است. ضرایب سختی جانبی طبقات روسازه از طبقه اول تا طبقه آخر به ترتیب ۵۱۴/۳۳، ۵۰۰/۰۵، ۴۷۱/۴۷، ۴۲۸/۶۱، ۳۷۱/۴۶، ۳۰۰/۰۳، ۲۱۴/۳۱، ۱۱۴/۳۰ با واحد MN/mdm می‌باشند. زمان تناوب اصلی سازه و نسبت میرایی سازه به ترتیب $T_s = 0.91$ ثانیه و $\xi_s = 5\%$ درصد است. جرم طبقه پایه ۳۰۰ تن در نظر گرفته شده است. یک سیستم جداسازی غیرخطی LRB با دوره تناوب و نسبت میرایی $T_b = 2/5$ ثانیه و $\xi_b = 5\%$ درصد در طبقه پایه سازه قرار دارد. نسبت سختی پس از تسلیم به پیش تسلیم $\alpha = 0.1$ و نیروی تسلیم جداساز Q_y برابر با ۵ درصد وزن کل سازه است. یک محرک در طبقه پایه، نیروی کنترلی را به طبقه پایه اعمال می‌کند. مدل‌سازی سازه هوشمند جدا شده در پایه غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام شد. برای این منظور معادله دیفرانسیل حاکم بر رفتار سازه به کمک روش رانگ-کوتا و بازه زمانی نمونه‌های شتاب وارده برابر ۰/۰۱ ثانیه و

جدول ۲. حداکثر پاسخ‌های لرزه‌ای سازه جداشده در پایه در سه حالت کنترل نشده و کنترل شده با رهیافت‌های کنترلی پیشنهادشده - TLBO-PID و ANN-OPID

Table 2. Maximum seismic responses of the base-isolated structure in three uncontrolled and controlled states with the proposed TLBO-PID and ANN-OPID control approaches.

حالت	زلزله	X_b^{Peak} (cm)	a_f^{peak} (m/s ²)	d_f^{Peak} (cm)	X_b^{RMS} (cm)	a_f^{RMS} (m/s ²)	d_f^{RMS} (cm)
بدون کنترل	دوزجه	۱۷/۵۵	۱/۵۲	۰/۱۱	۴/۷۶	۰/۳۴	۰/۰۳
	کوچوالی	۵۱/۸۹	۲/۳۲	۰/۱۲	۹/۰۲	۰/۳۲	۰/۰۳
	ال سنترو	۱۸/۰۰	۱/۲۰	۰/۰۹	۴/۱۵	۰/۲۴	۰/۰۲
	هاچینهو	۱۷/۶۵	۱/۶۰	۰/۰۷	۷/۰۸	۰/۳۴	۰/۰۴
	کوبه	۲۰/۲۶	۲/۶۰	۰/۱۷	۲/۵۴	۰/۲۳	۰/۰۲
	نورثریج	۴۸/۲۸	۲/۷۵	۰/۲۰	۸/۵۳	۰/۳۲	۰/۰۲
TLBO-PID	دوزجه	۱۳/۵۱	۲/۲۰	۰/۱۳	۳/۹۵	۰/۴۶	۰/۰۴
	کوچوالی	۳۵/۸۰	۲/۲۷	۰/۱۲	۶/۲۲	۰/۳۱	۰/۰۳
	ال سنترو	۱۲/۴۲	۱/۶۳	۰/۱۰	۲/۹۱	۰/۲۳	۰/۰۲
	هاچینهو	۱۲/۷۱	۱/۱۵	۰/۰۷	۵/۱۰	۰/۳۳	۰/۰۴
	کوبه	۱۹/۰۴	۳/۰۷	۰/۱۷	۲/۰۸	۰/۲۳	۰/۰۲
	نورثریج	۳۸/۶۲	۴/۵۱	۰/۲۲	۶/۸۲	۰/۴۲	۰/۰۲
ANN-OPID	دوزجه	۱۱/۰۶	۱/۴۷	۰/۱۱	۳/۸۱	۰/۳۳	۰/۰۳
	کوچوالی	۳۰/۶۲	۲/۰۴	۰/۱۱	۵/۵۰	۰/۲۹	۰/۰۳
	ال سنترو	۱۱/۸۸	۱/۱۸	۰/۰۹	۲/۸۶	۰/۲۲	۰/۰۲
	هاچینهو	۱۱/۳۰	۰/۹۹	۰/۰۶	۴/۲۵	۰/۳۱	۰/۰۳
	کوبه	۱۶/۴۱	۲/۵۲	۰/۱۵	۱/۸۰	۰/۲۱	۰/۰۲
	نورثریج	۳۱/۳۸	۲/۷۰	۰/۲۰	۵/۹۷	۰/۳۱	۰/۰۲
میانگین درصد کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای کنترل کننده TLBO-PID نسبت به حالت کنترل نشده		۲۳/۹۲	-۲۳/۶۹	-۶/۵۸	۲۴/۹۴	-۱۰/۶۱	-۶/۲۵
میانگین درصد کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای کنترل کننده ANN-OPID نسبت به حالت کنترل نشده		۳۵/۱۲	۹/۰۹	۵/۲۶	۳۲/۹۵	۶/۷۰	۶/۲۵

جابه‌جایی جداساز نسبت به حالت بدون کنترل در زلزله‌های دوزجه، کوچوالی، ال سنترو و نورثریج را گزارش نمود. لازم به ذکر است که کنترل کننده ANN-OPID نسبت به کنترل کننده TLBO-PID عملکرد بهتری را در کاهش جابه‌جایی جداساز داشته است. به‌عنوان مثال کنترل کننده ANN-OPID حدود ۱۸٪، ۱۴٪، ۱۳٪ و ۱۹٪ کاهش را در جابه‌جایی جداساز نسبت به کنترل کننده ANN-OPID را به ترتیب در زلزله‌های یادشده فراهم نموده است.

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، هرگونه تلاش برای کاهش جابه‌جایی تراز جداساز با بهره‌گیری از ابزارهای کنترلی ممکن است سبب افزایش شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات روسازه شود. مطابق با نتایج درج‌شده در جدول

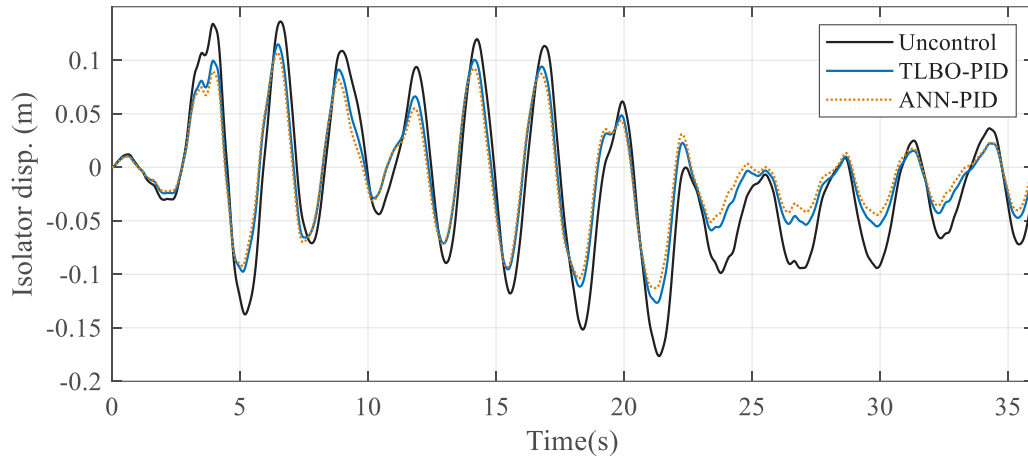
جابه‌جایی نسبی طبقات روسازه است. همچنین X_b^{RMS} ، a_f^{RMS} و d_f^{RMS} به ترتیب جذر میانگین مربعات جابه‌جایی تراز جداساز، جذر میانگین مربعات شتاب طبقات روسازه و جذر میانگین مربعات جابه‌جایی نسبی طبقات روسازه را نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود کنترل کننده TLBO-PID در کاهش جابه‌جایی جداساز عملکرد موفقی را در تمام زلزله‌های مورد مطالعه داشته است به‌عنوان نمونه می‌توان به کاهش ۲۳٪، ۳۱٪، ۳۱٪ و ۲۰٪ در جابه‌جایی جداساز نسبت به حالت بدون کنترل در زلزله‌های دوزجه، کوچوالی، ال سنترو و نورثریج اشاره کرد. در مقابل کنترل کننده ANN-OPID نیز در کاهش جابه‌جایی جداساز در تمام زلزله‌های مورد مطالعه عملکرد موفقی را داشته که از آن جمله می‌توان به کاهش ۳۶٪، ۴۰٪، ۳۴٪ و ۳۵٪ در

برای مقایسه بهتر عملکرد دو کنترل کننده، در طول زمان زلزله، تاریخچه زمانی جابه‌جایی پایه و شتاب طبقه بام در طول زلزله هاچینهو به‌عنوان یک زلزله حوزه دور در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین به‌طور مشابه، تاریخچه زمانی جابه‌جایی پایه و شتاب طبقه بام در طول زلزله نورث‌ریج به‌عنوان یک زلزله حوزه نزدیک در شکل ۵ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که گرچه هر دو کنترل کننده در کاهش جابه‌جایی تراز جداساز در زلزله‌های حوزه نزدیک و حوزه دور عملکرد مناسبی دارند، اما کنترل کننده ANN-OPID عملکرد بهتری را در این خصوص از خود نشان می‌دهد. به‌عنوان نمونه کنترل کننده ANN-OPID منجر به کاهش ۱۱٪ و ۱۹٪ در بیشینه جابه‌جایی جداساز نسبت به کنترل کننده TLBO-PID در زلزله‌های نورث‌ریج و هاچینهو داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که رهیافت کنترل کننده ANN-OPID عملکرد بهتری را در کاهش شتاب بام سازه نسبت به کنترل کننده TLBO-PID در دو زلزله یادشده حوزه نزدیک و حوزه دور فراهم می‌نماید. به‌عنوان مثال در زلزله حوزه نزدیک نورث‌ریج و زلزله حوزه دور هاچینهو، کنترل کننده ANN-OPID منجر به کاهش ۱۴٪ و ۴۰٪ در بیشینه شتاب طبقات روبنا نسبت به کنترل کننده TLBO-PID شده است. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت اگرچه هر دو کنترل کننده پیشنهادی TLBO-PID و ANN-OPID عملکرد موفقی را در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه جاداشده داشته‌اند، لیکن برتری رهیافت کنترل کننده ANN-OPID نسبت به کنترل کننده TLBO-PID در کاهش مشهود است. همچنین در مقایسه با کنترل کننده TLBO-PID، کنترل کننده ANN-OPID ضمن حفظ برتری خود در کاهش جابه‌جایی تراز جداساز سبب کاهش بیشتر شتاب طبقات روسازه شده است. در ضمن هر دو کنترل کننده موجبات کاهش ناچیزی در جابه‌جایی نسبی طبقات روسازه شده‌اند. به‌منظور مقایسه عملکرد بلوک شبکه عصبی به‌کاررفته در ساختار کنترل پیشنهادی برای تخمین برخط رفتار دینامیکی سازه، تاریخچه زمانی مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده سرعت جداساز در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود اختلاف مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده بسیار ناچیز بوده و بنابراین شبکه عصبی به‌کاررفته در ساختار کنترل پیشنهادی به‌خوبی توانسته رفتار دینامیکی سیستم جداساز را پیش‌بینی نماید.

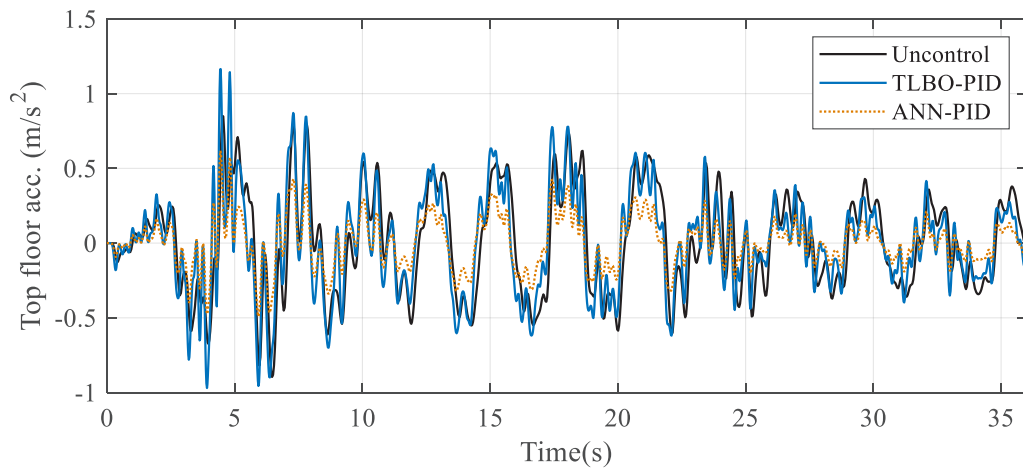
۲، کنترل کننده TLBO-PID سبب کاهش بیشینه شتاب طبقات روسازه در برخی از زلزله‌ها همچون کوچوالی و هاچینهو شده است، لیکن در زلزله‌هایی همچون دوزجه، ال سنترو، کوبه و نورث‌ریج منجر به افزایش شتاب طبقات روسازه شده است. باین‌حال در زلزله‌هایی همچون دوزجه، ال سنترو، کوبه و نورث‌ریج که کنترل کننده TLBO-PID سبب افزایش شتاب طبقات روسازه شده است، کنترل کننده ANN-OPID کاهش ۳/۳٪، ۱/۶٪، ۳٪ و ۱/۸٪ شتاب طبقات روسازه نسبت به حالت بدون کنترل را فراهم نموده است. همچنین مشاهده می‌شود که در مورد عملکرد نسبی دو رهیافت کنترلی، به‌عنوان نمونه کنترل کننده ANN-OPID منجر به کاهش ۱۰٪ و ۱۴٪ در شتاب طبقات روبنا نسبت به کنترل کننده TLBO-PID در زلزله‌های کوچوالی و هاچینهو شده است.

نتایج مندرج در جدول ۲ نشان می‌دهند که در مورد کاهش مقادیر جذر میانگین مربعات جابه‌جایی جداساز، هر دو رهیافت کنترلی عملکرد مناسبی داشته‌اند. برای نمونه کنترل کننده TLBO-PID منجر به کاهش ۱۷٪، ۳۱٪، ۱۸٪ و ۲۰٪ در جذر میانگین مربعات جابه‌جایی جداسازی نسبت به حالت بدون کنترل در زلزله‌های دوزجه، کوچوالی، کوبه و نورث‌ریج شده و در مقابل کنترل کننده ANN-OPID منجر به کاهش ۱۹٪، ۳۹٪، ۲۹٪ و ۳۰٪ برای زلزله‌های مذکور شده است. همچنین دریافت می‌شود که رهیافت کنترل کننده ANN-OPID در کاهش مقادیر جذر میانگین مربعات شتاب طبقات روسازه عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده TLBO-PID دارد. درحالی‌که کنترل کننده ANN-OPID سبب کاهش جذر میانگین مربعات شتاب طبقات روسازه در تمامی زلزله مورد مطالعه شده، اما کنترل کننده TLBO-PID در برخی زلزله‌ها همچون دوزجه و نورث‌ریج منجر به افزایش این شاخص شده است. برای نمونه کنترل کننده ANN-OPID سبب کاهش ۲۸٪، ۶/۴٪ و ۸/۶٪ در جذر میانگین مربعات شتاب طبقات روبنا نسبت به کنترل کننده TLBO-PID در زلزله‌های دوزجه، کوچوالی و کوبه شده است. در مورد آن رهیافت‌های کنترلی مورد مطالعه، کاهش ناچیزی را نسبت به حالت بدون کنترل داشته‌اند، لذا ضمن اثرگذاری مؤثر در کاهش جابه‌جایی تراز جداساز سبب افزایش بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات روسازه و جذر میانگین مربعات آنان نشده‌اند و اهداف کنترلی مورد نیاز طراح را فراهم نموده‌اند.

(الف)



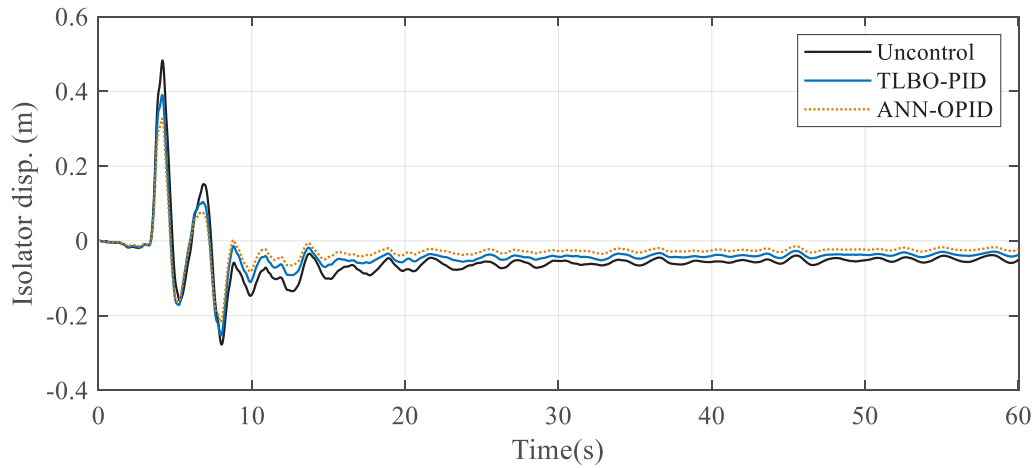
(ب)



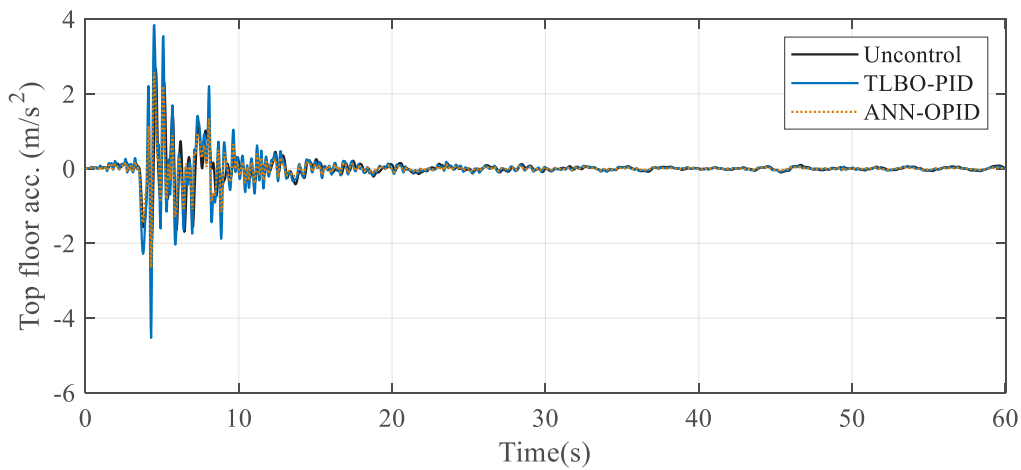
شکل ۴. مقایسه تاریخچه زمانی الف) جابه‌جایی پایه و ب) شتاب طبقه بام، در سازه جداشده در سه حالت کنترل نشده و کنترل‌شده با رهیافت‌های کنترلی پیشنهادشده TLBO-PID و ANN-OPID تحت رکورد زلزله هاجینهو.

Fig. 4. Comparison of the time history of a) base displacement and b) roof acceleration, in the base-isolated structure in three uncontrolled and controlled states with the proposed TLBO-PID and ANN-OPID control approaches under Hachinho earthquake record.

(الف)



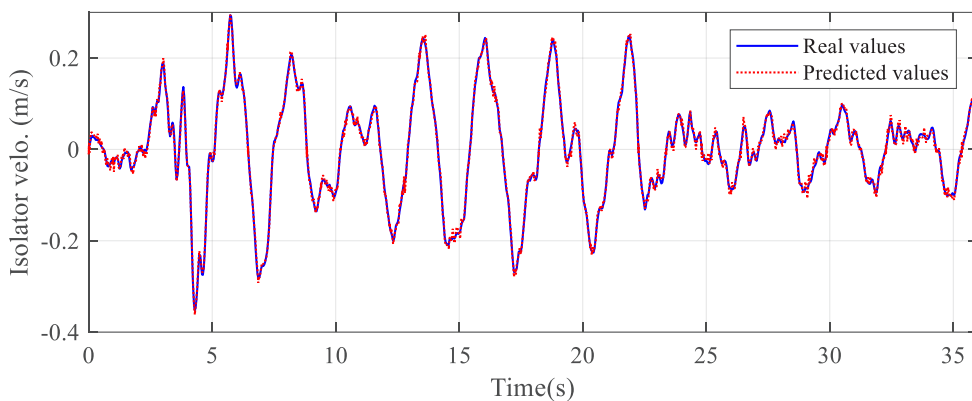
(ب)



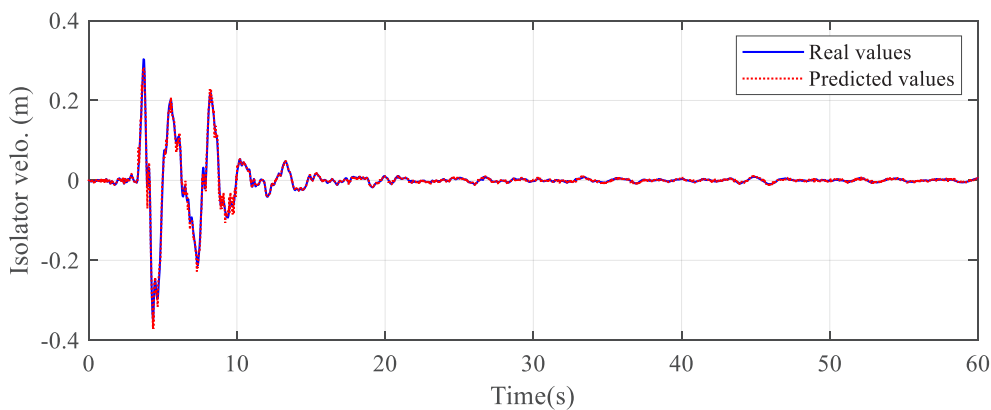
شکل ۵. مقایسه تاریخیچه زمانی الف) جابه‌جایی پایه و ب) شتاب طبقه بام، در سازه جداشده در سه حالت کنترل نشده و کنترل شده با رهیافت‌های کنترلی پیشنهادشده TLBO-PID و ANN-OPID تحت رکورد زلزله نورتریج.

Fig. 5. Comparison of the time history of a) base displacement and b) roof acceleration, in the base-isolated structure in three uncontrolled and controlled states with the proposed TLBO-PID and ANN-OPID control approaches under Northridge earthquake record.

(الف)



(ب)



شکل ۶. مقایسه تاریخچه زمانی سرعت جداساز واقعی و سرعت جداساز تخمین زده به وسیله شبکه عصبی RBF بکار رفته در ساختار کنترلی پیشنهادی تحت رکورد الف) زلزله هاجینهو ب) زلزله نورثریج.

Fig. 6. Comparison of the time history of the actual velocity of the isolator and the estimated speed of the isolator by means of the RBF neural network used in the proposed control structure under the records of a) Hatchinho earthquake b) Northridge earthquake.

۷- نتیجه گیری

می‌دهند که کنترل کننده TLBO-PID به طور میانگین منجر به کاهش ۲۴٪ و ۲۵٪ بیشینه جابه‌جایی تراز جداساز و جذر میانگین مربعات آن شده است، درحالی‌که این کنترل کننده موجبات افزایش ۲۴٪ و ۱۱٪ بیشینه شتاب طبقات روسازه و جذر میانگین مربعات آن و همچنین افزایش ۶٪ و ۶٪ بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات روسازه و جذر میانگین مربعات آن شده است. رهیافت کنترل کننده پیشنهادی ANN-OPID علی‌رغم کاهش ۳۵٪ و ۳۳٪ بیشینه جابه‌جایی تراز جداساز و جذر میانگین مربعات آن، بیشینه شتاب طبقات روسازه و جذر میانگین مربعات آن را به میزان ۹٪ و ۷٪ کاهش داده است. همچنین سبب کاهش ۵٪ و ۶٪ بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات روسازه و جذر میانگین مربعات آن شده است؛ لذا درحالی‌که کاهش

باهداف بهره‌گیری هم‌زمان از مزیت‌های کنترل کننده کلاسیک PID و شبکه‌های عصبی، یک رهیافت کنترلی تطبیقی موسوم به ANN-OPID برای به‌کارگیری در سازه‌های جدا شده هوشمند پیشنهاد شد. در این رهیافت دینامیک سیستم سازه‌ای به وسیله بلوک شبکه عصبی تخمین و بر اساس آن پارامترهای کنترل کننده PID به صورت تطبیقی تنظیم می‌شود. برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای رهیافت کنترلی پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده بهینه متداول PID تنظیم شده با الگوریتم TLBO موسوم به کنترل کننده TLBO-PID، یک سازه ۸ طبقه مجهز به جداسازهای غیرخطی در معرض ۶ زلزله مختلف نزدیک و دور از گسل شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان

Structures, 6(2) (2014) 217-235.

- [10] S. Etedali, S. Tavakoli, M.R. Sohrabi, Design of a decoupled PID controller via MOCS for seismic control of smart structures. *Earthquakes and Structures*, 10(5) (2016) 1067-1087.
- [11] M. Arif Şen, M. Tinkir, M. Kalyoncu, Optimisation of a PID controller for a two-floor structure under earthquake excitation based on the bees algorithm. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 37(1) (2018) 107-127.
- [12] S. Etedali, A new modified independent modal space control approach toward control of seismic-excited structures, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(10) (2017) 4215-4243.
- [13] M. Shahi, M.R. Sohrabi, S. Etedali, Seismic control of high-rise buildings equipped with ATMD including soil-structure interaction effects, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 12(03) (2018) 1850010.
- [14] J.P. Zand, J. Sabouri, J. Katebi, M. Nouri, A new time-domain robust anti-windup PID control scheme for vibration suppression of building structure, *Engineering Structures*, 244 (2021) 112819.
- [15] S. Etedali, M.R. Sohrabi, S. Tavakoli, Optimal PD/PID control of smart base isolated buildings equipped with piezoelectric friction dampers. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 12(1) (2013) 39-54.
- [16] S. Etedali, Sensitivity analysis on optimal PID controller for nonlinear smart base-isolated structures. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 19(07) (2019) 1950080.
- [17] A.A. Zamani, S. Tavakoli, S. Etedali, Control of piezoelectric friction dampers in smart base-isolated structures using self-tuning and adaptive fuzzy proportional-derivative controllers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(10) (2017) 1287-1302.
- [18] A.A. Zamani, S. Tavakoli, S. Etedali, J. Sadeghi, Adaptive fractional order fuzzy proportional-integral-derivative control of smart base-isolated structures equipped with magnetorheological dampers. *Journal of*

جابه‌جایی تراز جداساز در نتیجه بهره‌گیری از کنترل‌کننده TLBO-PID به هزینه افزایش شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات روسازه حاصل شده است، کنترل‌کننده پیشنهادی ANN-OPID ضمن کاهش بیشتر جابه‌جایی تراز جداساز، شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات روسازه را نیز کاهش داده است.

منابع

- [1] F. Naeim, J.M. Kelly, Design of seismic isolated structures: from theory to practice, John Wiley & Sons, (1999).
- [2] H.J. Lee, G. Yang, H.J. Jung, B.F. Spencer, I.W. Lee, Semi-active neurocontrol of a base-isolated benchmark structure. *Structural Control and Health Monitoring*, 13(2-3) (2006) 682-692.
- [3] S. Nagarajaiah, S. Sahasrabudhe, Seismic response control of smart sliding isolated buildings using variable stiffness systems: an experimental and numerical study. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35(2) (2006) 177-197.
- [4] M. Ramezani, M.S. Labafzadeh, Passive and semi-active vibration control of base-isolated structure under blast loading at medium to long distances, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(2) (2022) 435-456.
- [5] M. Seify Asghshahr, S. Rafiei, Seismic Response of Base-isolated Dual-system Reinforced Concrete Buildings at a Near-fault Site, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(4) (2022) 1607-1630.
- [6] R. Guclu, Sliding mode and PID control of a structural system against earthquake. *Mathematical and Computer Modelling*, 44(1-2) (2006) 210-217.
- [7] N. Aguirre, F. Ikhouane, J. Rodellar, Proportional-plus-integral semiactive control using magnetorheological dampers, *Journal of Sound and Vibration*, 330(10) (2011) 2185-2200.
- [8] S.M. Nigdeli, M.H. Boduroğlu, Active tendon control of torsionally irregular structures under near-fault ground motion excitation, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(9) (2013) 718-736.
- [9] S.M. Nigdeli, Effect of feedback on PID controlled active structures under earthquake excitations. *Earthquakes and*

- Computer-aided design, 43(3) (2011) 303-315.
- [24] S. Nagarajaiah, S. Narasimhan, Seismic control of smart base isolated buildings with new semiactive variable damper, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(6) (2007) 729-749.
- [25] A.N. Sharkawy, Principle of neural network and its main types, *Journal of Advances in Applied & Computational Mathematics*, 7 (2020) 8-19.
- [26] H. Yu, T. Xie, S. Paszczyński, B.M. Wilamowski, Advantages of radial basis function networks for dynamic system design, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(12) (2011) 5438-5450.
- [27] P. Jeatrakul, K.W. Wong, Comparing the performance of different neural networks for binary classification problems, In 2009 Eighth International Symposium on Natural Language Processing, (2009) 111-115.
- [28] Applied Technology Council, Quantification of building seismic performance factors, US Department of Homeland Security, FEMA, (2009).
- Intelligent Material Systems and Structures, 29(5) (2018) 830-844.
- [19] A.A. Zamani, S. Tavakoli, S. Etedali, J. Sadeghi, Online tuning of fractional order fuzzy PID controller in smart seismic isolated structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(7) (2018) 3153-3170.
- [20] D. Ma, , M. Song, P. Yu, J. Li, Research of RBF-PID control in maglev system, *Symmetry*, 12(11) (2020) 1780.
- [21] Y. Zhong, X. Huang, P. Meng, F. Li, PSO-RBF neural network PID control algorithm of electric gas pressure regulator, In *Abstract and Applied Analysis*, Hindawi 2014 (2014).
- [22] S. Etedali, A.A. Zamani, Semi-active control of nonlinear smart base-isolated structures using MR damper: sensitivity and reliability analyses. *Smart Materials and Structures*, 31(6) (2022) 065021.
- [23] R.V. Rao, V.J. Sivsani, D.P. Vakharia, Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. A. Zamani , S. Etedali , *Control of smart non-linear base-isolated structures using optimal adaptive neural network-based PID controller , Amirkabir J. Civil Eng., 55(8) (2023) 1661-1676.*

DOI: 10.22060/ceej.2023.21765.7819

