



Damage detection of model reference adaptively-controlled structures using control force as a damage sensitive feature

H. Shirzadi, M. Bitaraf *

School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT: Civil infrastructures, nowadays, are an indispensable part of society, and any unpredicted damage can cause severe economic and life loss. Hence, developing smart structures has been the topic of many studies during the past decades. In this article, developing a smart structure by synthesizing structural control and health monitoring is suggested by extracting damage-sensitive features from the active control force. The autoregressive models have been deployed to extract damage-sensitive features in the time domain. Then, quadratic discriminant analysis is utilized to discriminate between different damage states of the structure. The active control force is obtained by two model reference adaptive controllers, namely the MIT rule and Lyapunov stability theorem, to attenuate the structural vibration caused by Gaussian white noise excitations. The proposed approach has been numerically studied on a three-story shear building with active ideal controllers in all floors. Results indicate that the proposed approach can detect the potential damage, as well as its severity and location, precisely.

Review History:

Received: Non. 16, 2021
Revised: Aug. 23, 2022
Accepted: Nov. 29, 2022
Available Online: Dec. 28, 2022

Keywords:

Structural health monitoring
Damage detection
Vibration control
Discriminant analysis
Smart structure

1- Introduction

Civil structures and infrastructures are an indispensable part of today's life, and any damage and failure in them will be catastrophic [1]. These structures are prone to damage due to natural and manmade events [2]. Currently, a large number of the structures in Iran are closing their design life. Hence, developing damage detection methods for them seems necessary. In the last decades, structural vibration control methods have been implemented as a practical approach to attenuate the structural responses and mitigate the potential damage [3]. Different passive, semi-active, active, and hybrid vibration control algorithms and devices have been proposed in the literature and used in practice [4, 5]. Despite the fact that there have been many advances in the field of structural damage detection and health monitoring in the past decades, unfortunately, it has been studied separately, and only a few studies address the synthesis of structural control and health monitoring [6]. Both structural control and health monitoring need a network of sensors, data acquisition transmission, and processing. Thus, it seems reasonable to create smart structures by combining structural health monitoring and vibration control. In the literature, structures mimicking biological systems are called smart structures. In other words, a structure equipped with structural control, structural health monitoring, structural self-repairing, and structural energy

harvesting systems is called a smart structure [1]. In this study, the authors suggest combining structural health monitoring and structural vibration control by extracting the damage-sensitive features directly from the active control force.

2- Methodology

In this article, a three-story shear building has been modeled numerically to evaluate the proposed methodology. It is assumed that the structure is equipped with active actuators on all three floors. The actuators are considered ideal so that they can produce the desired control force calculated by the control algorithms without limitation and time delay.

Six damage scenarios are defined to model the damage effects on the structure. The damage is modeled as stiffness loss in columns of each floor. At each story, two levels of damage, i.e., 50 percent and 70 percent stiffness loss, are assumed to be the corresponding damage scenarios.

The structure is then excited with white Gaussian noise with zero mean and unit variance. For calculating the control forces, two well-studied model reference adaptive controllers, i.e., the MIT rule and Lyapunov stability theorem, are utilized [7]. The controllers are adjusted to attenuate the response on the structure to 30 percent of the undamaged structure. The structure is excited at each damage scenario with 50 different Gaussian noises, and the corresponding control force for all

*Corresponding author's email: maryam.bitaraf@ut.ac.ir



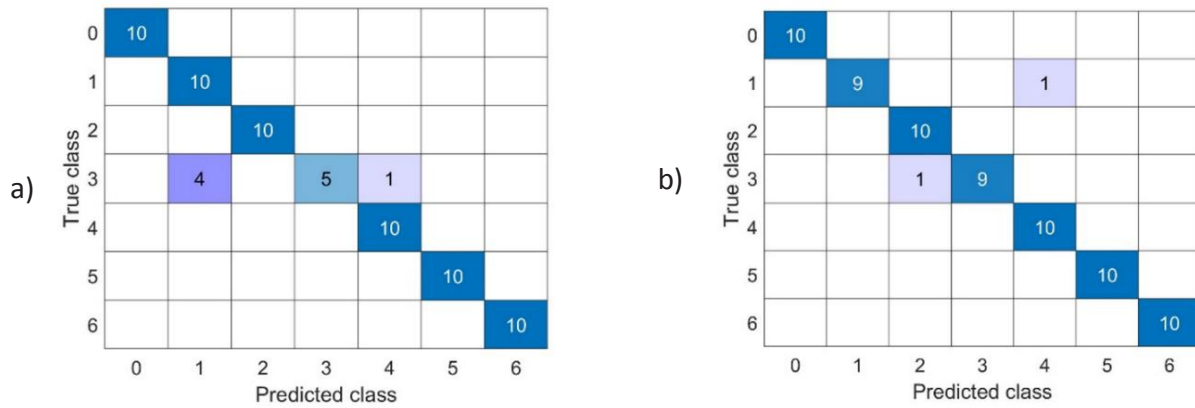


Fig. 1. Confusion matrix of the proposed damage detection algorithm a) when MIT Rule controllers are utilized b) when the Lyapunov stability theorem is used for calculating the control forces.

damage states and controllers is calculated.

The Auto-Regressive (AR) method is then utilized to extract damage-sensitive features from the control force. Herein the AR(3) model’s coefficients are used to train a machine-learning algorithm to identify the damaged state of the structure. Since there are three actuators in the structure, there will be three control forces. The corresponding AR(3) coefficients are combined to create a vector of damage-sensitive features. Several classification algorithms, namely, decision trees, linear and quadratic discriminant analysis, Support vector machines with different kernels, and K nearest neighbors, were tested for this particular classification problem. The quadratic discriminant analysis was selected due to higher accuracy for the training data sets. The training data sets comprise 80 percent of the total data, and the remaining 20 percent is deployed to test the trained classifiers. The K-fold method is utilized to prevent overfitting.

A three-step algorithm is suggested in this study, namely, detecting potential damage, finding the location of damage, and calculating the damage’s severity to identify the structure’s damage state. In the first step, the data of the undamaged structure and damaged structures with different damage scenarios are utilized for training a classifier. If all three classifiers predict the unknown data as undamaged, the unknown data is labeled undamaged. Otherwise, the data is fed to the next step classifier. The second step is in charge of detecting the location of the damage. A classification model based on the damage location is trained to achieve this objective. At each story, there are two damage levels, and in this step, both of them are combined and labeled as the location of the damage. As a result, there will be three clusters. The trained classifier is then utilized to determine whether the damage is at the first, second, or third story. After that, in the last step, three different classifiers are trained

to quantify the damage severity at each story. For example, when the damage is identified on the first floor in the second step, the data from different damage levels on the first floor is used to train the classifiers.

3- Results and Discussion

The remaining dataset was selected as a test dataset and was utilized to evaluate the proposed damage detection algorithm’s performance. The unknown damage state of the test data set is then identified using the output of the trained classifiers. Based on the true class and the predicted class for the test dataset, the confusion matrix is shown in Figure 1. In this figure, class 0 shows the undamaged structure, classes 1, 2, and 3 show mild damage in the first, second, and third stories, respectively, and classes 4, 5, and 6 show severe damage in the first, second and third stories. The results indicate that the proposed methodology can accurately detect the potential damage in the structure. The algorithm correctly predicts all the damaged and undamaged cases for the MIT rule and Lyapunov stability theorem controllers. And in terms of predicting the location and severity of the damage has an accuracy of 93 percent and 97 percent for the MIT rule and Lyapunov controllers, respectively.

4- Conclusions

This paper suggested a new methodology for structural health monitoring of actively controlled structures. A numerical model of a three-story shear building was developed to evaluate the proposed method, and the control forces were calculated for 50 Gaussian noise inputs for six damage scenarios. The results indicated that extracting damage-sensitive features directly from active control force can be utilized for damage detection of controlled structures. The proposed method can detect potential damage at the structure and locate and quantify the damage.

References

- [1] Y.-L. Xu, J. He, Smart civil structures, CRC Press, 2017.
- [2] J.P. Amezquita-Sanchez, H. Adeli, Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures, Archives of Computational Methods in Engineering, 23(1) (2016) 1-15.
- [3] C.R. Farrar, K. Worden, Structural health monitoring: a machine learning perspective, John Wiley & Sons, 2012.
- [4] B. Spencer Jr, S. Nagarajaiah, State of the art of structural control, Journal of structural engineering, 129(7) (2003) 845-856.
- [5] T. Soong, B. Spencer Jr, Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice, Engineering structures, 24(3) (2002) 243-259.
- [6] J. He, Y.-L. Xu, S. Zhan, Q. Huang, Structural control and health monitoring of building structures with unknown ground excitations: experimental investigation, Journal of Sound and Vibration, 390 (2017) 23-38.
- [7] K.J. Åström, B. Wittenmark, Adaptive control, Courier Corporation, 2013.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Shirzadi, M. Bitaraf, *Damage detection of model reference adaptively-controlled structures using control force as a damage sensitive feature*, Amirkabir J. Civil Eng., 55(2) (2023) 65-68.

DOI: [10.22060/ceej.2022.20786.7526](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20786.7526)





شناسایی آسیب در سازه‌های با کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع با استفاده از نیروی کنترل به عنوان مشخصه حساس به آسیب

هومن شیرزادی، مریم بیطرف*

دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۵
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

کلمات کلیدی:

پایش سلامت سازه
تشخیص خرابی
کنترل ارتعاشات
آنالیز افتراقی
سازه هوشمند

خلاصه: سازه‌های عمرانی مانند ساختمان‌ها و پل‌ها از حیاتی‌ترین نیازهای جامعه امروز هستند و خرابی پیش‌بینی نشده یا از دست رفتن سرویس‌دهی آن‌ها موجب خسارت‌های جبران‌ناپذیر جانی و مالی خواهد شد. برای مقابله با این خطرات، ساخت سازه‌های هوشمند در دهه‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. در این مقاله ساخت یک سازه هوشمند با استفاده ترکیب روش‌های کنترل فعال ارتعاشات و روش‌های پایش سلامت سازه پیشنهاد شده است. برای نیل به این هدف، مشخصه‌های حساس به آسیب به جای پاسخ سازه از نیروی کنترل استخراج شده است. پردازش سیگنال نیروی کنترل برای شناسایی خرابی احتمالی در سازه، در فضای زمان و با استفاده از مدل‌های خود همبسته انجام شده است. برای کنترل سازه از دو الگوریتم آم‌آی‌تی و تئوری پایداری لیاپانوف استفاده شده است. پس از تحریک سازه با استفاده از نویز سفید، نیروی کنترل حاصل از دو الگوریتم کنترل فوق، در حالات سالم و سناریوهای مختلف خرابی محاسبه شده است. سپس با استفاده از ضرایب مدل خود همبسته به عنوان ورودی‌های روش آنالیز افتراقی که یک روش طبقه‌بندی نظارت شده است، محل و شدت خرابی‌های احتمالی در سازه مشخص شده‌اند. روش پیشنهادی روی یک قاب برشی سه طبقه به صورت عددی مدل‌سازی شده است. نتایج به دست آمده نشانگر این است که روش پیشنهادی می‌تواند محل و میزان خرابی در سازه با دقت بالایی تشخیص دهد.

۱- مقدمه

سازه‌های حوزه مهندسی عمران، مانند بزرگراه‌ها، ساختمان‌های بلند و پل‌ها یک جز بسیار مهم و ضروری در زندگی امروزه هر جامعه‌ای هستند. بروز هر گونه خرابی در این سازه‌ها می‌تواند باعث خسارات جانی و مالی جبران‌ناپذیری شود [۱]. سازه‌ها به دلایل گوناگون مانند زلزله‌های شدید، طوفان‌ها، استفاده نادرست و خوردگی در معرض آسیب قرار دارند و هر ساله هزینه بسیاری برای بازسازی و یا ساخت مجدد آن‌ها صرف می‌شود [۲]. در حال حاضر بسیاری از سازه‌های مهم کشور در حال نزدیک شدن به پایان عمر طراحی آن‌ها هستند و پایش سلامت آن‌ها برای تشخیص زودهنگام خرابی دارای اهمیتی روزافزون است. در چند دهه گذشته استفاده از روش‌های کنترل ارتعاشات به عنوان یک راه‌حل عملی جهت افزایش پایداری و سرویس‌پذیری سازه در برابر رخدادهای شدید طبیعی و غیرطبیعی مورد توجه محققان این حوزه قرار گرفته است [۳]. سیستم‌های کنترل غیرفعال سازه، مانند استفاده از میراگرهای جرمی غیرفعال و سیستم‌های

جداسازی پایه به عنوان یک راهکار مطمئن جهت حفظ پایداری سازه شناخته شده‌اند. اما برخلاف ویژگی‌های ذاتی غیرفعال و قابل اعتماد بودن، به دلیل عدم توانایی این روش‌های کنترل ارتعاشات در تطبیق با شرایط مختلف بارگذاری، الگوریتم‌های کنترل نیمه‌فعال، هیبریدی و فعال توسعه داده شده‌اند [۴-۶]. هر چند که در طی دهه‌های گذشته روش‌های پایش سلامت سازه و کنترل ارتعاشات آن موضوع بحث تحقیقات فراوانی بوده‌اند، اما در اکثر این تحقیقات به خاطر هدف متفاوت این دو مبحث به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۷]. سیستم‌های تشخیص آسیب سازه و کنترل ارتعاشات هر دو به سخت‌افزارهای مشابه برای کار نیاز دارند. مثلاً هر دوی آن‌ها به سنسور، شبکه‌ی جمع‌آوری و انتقال داده‌ها نیاز دارند. و استفاده از یک سیستم یکپارچه برای کنترل و پایش سلامت در مقابل استفاده از دو سیستم مستقل از هم منطقی به نظر می‌رسد و از نظر اقتصادی نیز به دلیل کاهش سخت‌افزارهای لازم موجه است.

سازه‌ی هوشمند به سازه‌ای اطلاق می‌شود که بتواند خصوصیات موجود زنده را به نحوی داشته باشد. به طور تخصصی در حیطه سازه‌های مهندسی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: maryam.bitaraf@ut.ac.ir



عمران، سازه‌ای که دارای ویژگی‌های پایش سلامت سازه، کنترل ارتعاشات، خود تعمیری و برداشت انرژی باشد، هوشمند خوانده می‌شود [۱].

در سال‌های اخیر تلاش‌هایی برای ساخت سازه‌های هوشمند با استفاده از سیستم‌های یکپارچه برای کنترل ارتعاشات و پایش سلامت سازه صورت گرفته است. اما بیشتر این تحقیقات در حیطه سازه‌های مهندسی مکانیک و هوافضا است [۸]. به خاطر اندازه بزرگ سازه‌های عمرانی و تعداد زیاد اعضای آن‌ها، پیچیدگی و عدم قطعیت‌های فراوان در مدل‌سازی و رفتار آن‌ها، چالش‌های بسیاری در توسعه سازه‌های هوشمند پیش روی محققان این حوزه قرار دارد [۱]. در ادامه برخی از نمونه‌های موجود در ادبیات فنی که به ترکیب سیستم‌های پایش سلامت و کنترل ارتعاشات برای ساخت سازه‌های هوشمند پرداخته‌اند آورده شده است. ری و تیان [۹] روشی برای افزایش حساسیت فرکانس به خرابی در سازه‌های کنترل شده پیشنهاد دادند. آن‌ها با تغییر مکان قطب‌های سیستم حلقه بسته در صفحه مختلط، اثرات خرابی بر تغییر فرکانس سازه‌های کنترل شده را افزایش دادند. در مطالعه‌ای دیگر گتولی و رومو [۱۰] از یک روش کنترلی مستقیم برای کنترل و پایش سلامت هم‌زمان سازه استفاده کردند. مؤلفان روش پیشنهادی خود را بر روی یک سازه برشی آزمایش کردند. خو و چن [۱۱] روشی برای کنترل و پایش سلامت هم‌زمان سازه‌ها با استفاده از میراگرهای اصطکاکی نیمه‌فعال پیشنهاد داده‌اند. در این روش از مقادیر به روز شده‌ی جرم و سختی برای کنترل سازه استفاده کردند و از بررسی تغییرات پارامترها در طول زمان، آسیب احتمالی در سازه را تشخیص دادند. محققان روش پیشنهادی خود را روی یک سازه پنج طبقه به صورت عددی امتحان کردند [۱۲]. ناگاراچه [۱۳] یک روش در حوزه زمان-فرکانس برای محاسبه فرکانس لحظه‌ای یک سازه خطی با پارامترهای متغیر در زمان پیشنهاد داد. از فرکانس لحظه‌ای به دست آمده برای تنظیم کردن یک میراگر جرمی برای کنترل ارتعاشات سازه استفاده شده است. روش پیشنهادی به صورت عددی توسط ناگاراچه بررسی شده است.

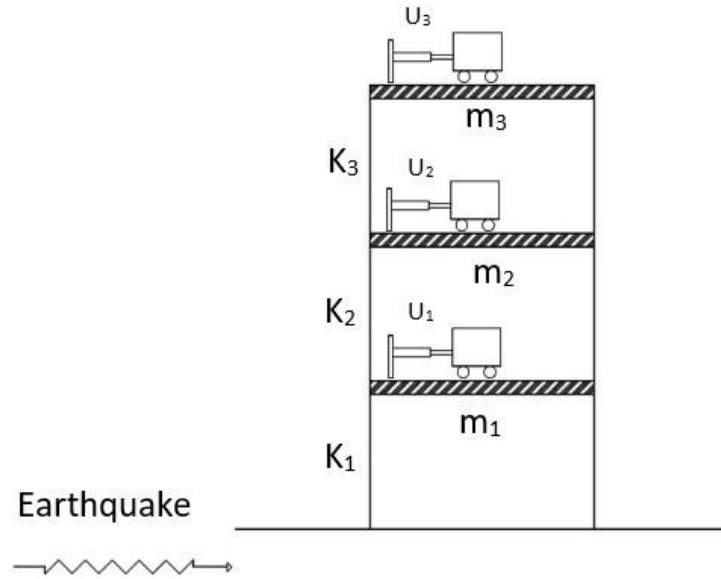
بیطرف و همکاران [۱۴]، یک روش برای کاهش اثرات خرابی در رفتار سازه‌های کنترل شده پیشنهاد کردند. آن‌ها با استفاده از ابزارهای کنترلی فعال و نیمه‌فعال، تلاش کردند تا رفتار سازه آسیب دیده کنترل شده مانند سازه سالم که عملکرد مطلوب را داراست، باشد. در مطالعه‌ای دیگر، دینگ و لائو [۱۵] یک فرآیند برای پایش سلامت و کنترل ارتعاشات هم‌زمان سازه‌های بزرگ پیشنهاد کرده‌اند. در این روش از کنترل کننده‌های درجه دو گوسی و سیستم‌های دارای سختی منفی برای کنترل و تشخیص خرابی

هم‌زمان در سازه استفاده شده است. یک روش یکپارچه برای شناسایی سیستم و تشخیص خرابی در سازه‌های مجهز به کنترل کننده‌های اصطکاکی غیرفعال توسط هوانگ و همکاران [۱۶] پیشنهاد شده است. این روش به صورت عملی روی یک سازه ۱۲ طبقه امتحان شده است [۱۷]. در تحقیقی دیگر، کرمی و امینی [۱۸] یک روش برای تشخیص خرابی آنالین و کاهش ارتعاشات هم‌زمان سازه‌های کنترل شده نیمه‌فعال در مقابل زلزله پیشنهاد کرده‌اند. لی و همکاران [۱۹] ترکیب یک روش کنترلی غیرمتمرکز و پایش سلامت سازه همراه با به دست آوردن تحریک خارجی نامعلوم را پیشنهاد کردند. این کار با استفاده از اندازه‌گیری پاسخ غیرکامل سازه همراه با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته انجام شده است. خو و همکاران [۲۰] هم یک روش بازگشتی حداقل مربعات خطا برای شناسایی پارامترهای متغیر در زمان سازه و تحریک خارجی و کنترل بهینه سازه را پیشنهاد کرده‌اند.

در مطالعات گذشته، پاسخ سازه یعنی، جابه‌جایی، سرعت و شتاب برای به دست آوردن ویژگی‌های حساس به خرابی استفاده شده‌اند. در مورد سازه‌های با کنترل فعال، به دلیل کاهش اثرات خرابی بر روی رفتار سازه به علت اعمال نیروی کنترل، توانایی روش‌های کلاسیک که از پاسخ سازه برای تشخیص خرابی استفاده می‌کنند کاهش می‌یابد. به همین دلیل در این مقاله استخراج ویژگی‌های حساس به آسیب از نیروی کنترل به جای پاسخ سازه پیشنهاد شده است. در مقاله پیش رو در قسمت دوم به بیان ویژگی‌های سازه، سناریوهای خرابی و تحریک خارجی پرداخته شده است. در قسمت سوم نحوه‌ی مدل‌سازی و استفاده از الگوریتم‌های کنترل تطبیقی مدل مرجع برای به دست آوردن نیروی کنترل در طول زمان توضیح داده شده است. استفاده از مدل‌های خود همبسته برای پردازش سیگنال‌های نیروی کنترل موضوع قسمت چهارم این مقاله است. قسمت پنجم به روش آنالیز افتراقی برای طبقه‌بندی داده‌ها می‌پردازد. نحوه تشخیص خرابی، محل و شدت آن در بخش ششم بررسی شده است و نهایتاً بحث درباره نتایج به دست آمده از این مطالعه عددی و نتیجه‌گیری، به ترتیب در قسمت‌های هفتم و هشتم این نوشتار آورده شده است.

۲- مشخصات سازه و سناریوهای خرابی

در این نوشتار روش پیشنهادی بر روی یک سازه سه طبقه به صورت عددی آزمایش شده است. سازه مذکور به صورت یک قاب برشی مدل‌سازی شده است و دارای کنترل کننده‌های فعال ایده‌آل در تمام طبقات است. منظور از کنترل کننده‌ی ایده‌آل این است که می‌تواند بدون تأخیر زمانی هر



شکل ۱. نمای کلی سازه

Fig. 1. Schematic view of the structure

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سازه

Table 1. Physical characteristics of the structure

طبقات	جرم (ton)	سختی جانبی (KN/m)
طبقه اول	۱۵۰	۲۰۰۰۰
طبقه دوم	۱۵۰	۱۸۰۰۰
طبقه سوم	۱۵۰	۱۵۰۰۰

تعیین شده‌اند که در هر طبقه دو سطح از خرابی وجود داشته باشد. نوع اول خرابی مربوط به کاهش ۵۰ درصدی در سختی جانبی هر کدام از طبقات است که به عنوان یک آسیب متوسط نام‌گذاری شده است. نوع دوم خرابی مربوط به یک خرابی با شدت بالا است که در آن در هر کدام از طبقات ۷۰ درصد سختی جانبی کاهش می‌یابد. جزئیات سناریوهای خرابی در جدول ۲ آمده است. همچنین فرض شده است که اثرات خرابی بر روی مقدار میرایی و جرم سازه ناچیز است و تنها سختی در اثر آسیب تغییر می‌کند. برای تحریک سازه از نویز سفید استاندارد با میانگین صفر و واریانس واحد استفاده شده است. سیگنال‌های تصادفی تولید شده سپس در جرم طبقات ضرب شده و به عنوان یک تحریک خارجی به سازه اعمال شده است.

مقدار نیرویی را که توسط الگوریتم کنترلی تعیین می‌شود را به سازه اعمال کنند. نمای کلی سازه مدل‌سازی شده در شکل ۱ نشان داده شده است. برای در نظر گرفتن میرایی ذاتی خود سازه، از روش رایلی با ۵ درصد میرایی در مود اول و دوم استفاده شده است. خصوصیات سازه از نظر جرم و سختی طبقات به نحوی در نظر گرفته شده است که الزامات آیین‌نامه‌های طراحی ایران را برای یک سازه سه طبقه کنترل نشده ارضا کند. مقادیر جرم هر طبقه و سختی جانبی طبقات در جدول ۱ آورده شده است.

برای بررسی اثر آسیب در سازه بر روی نیروی کنترل محاسبه شده در الگوریتم‌های کنترلی استفاده شده، شش سناریو خرابی برای سازه در نظر گرفته شده‌اند. خرابی به صورت کاهش سختی در ستون‌های سازه به صورت از دست دادن بخشی از سختی جانبی آن مدل شده است. سناریوها به شکلی

جدول ۲. سناریوهای خرابی

Table 2. Damage scenarios

نام سناریو	درصد کاهش سختی			حالت سازه
	طبقه اول	طبقه دوم	طبقه سوم	
Sc-0	۰	۰	۰	سازه سالم
Sc-1	۵۰	۰	۰	خرابی متوسط در طبقه اول
Sc-2	۰	۵۰	۰	خرابی متوسط در طبقه دوم
Sc-3	۰	۰	۵۰	خرابی متوسط در طبقه سوم
Sc-4	۷۰	۰	۰	خرابی شدید در طبقه اول
Sc-5	۰	۷۰	۰	خرابی شدید در طبقه دوم
Sc-6	۰	۰	۷۰	خرابی شدید در طبقه سوم

است. با در نظر گرفتن یک تابع هزینه به صورت معادله‌ی (۱):

$$J = \frac{1}{2}e^2 \quad (1)$$

پارامتر قابل تنظیم کنترل کننده یعنی θ را می‌توان به نحوی تغییر داد که تابع هزینه را کاهش دهد. یک راه برای این کاهش تغییر دادن θ در طول زمان در جهت عکس گرایان J است. با استفاده از قاعده مشتق‌گیری زنجیری می‌توان معادله (۲) را برای محاسبه تغییرات θ در طول زمان به دست آورد.

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (2)$$

که در آن γ یک ضریب اختیاری مثبت است. عبارت $\partial e / \partial \theta$ مشتق حساسیت سیستم نامیده می‌شود و مشخص می‌کند که تابع هزینه چگونه به پارامتر قابل تنظیم θ وابسته است. از آنجا که در این مسئله در تمام سه درجه آزادی سازه کنترل کننده وجود دارد، سه نیروی کنترل باید محاسبه شود. شکل کلی نیروی کنترل را به صورت معادله‌ی (۳) در نظر گرفته می‌شود:

$$U_3]^T = [\theta_1 U_{1c} \quad \theta_2 U_{2c} \quad \theta_3 U_{3c}]^T \quad (3)$$

۳- طراحی کنترل کننده

وظیفه‌ی الگوریتم‌های کنترلی تغییر مقدار ورودی یک سیستم به نحوی است که میزان خروجی برابر با مقدار مطلوب باشد. در روش‌های کنترل تطبیقی مدل مرجع این مقدار مطلوب می‌تواند پاسخ سازه‌ای باشد با خصوصیات مطلوب که در مقابله با تحریک‌های خارجی وارد شده به سازه پاسخ مناسبی دارد. در این مقاله پاسخ مطلوب سازه‌ای است که در صورت قرار گرفتن تحت تحریک یکسان پاسخ آن به مقدار ۷۰ درصد کمتر از پاسخ سازه‌ی سالم باشد. در واقع وظیفه الگوریتم‌های کنترلی کاهش پاسخ سازه‌های با وضعیت آسیب دیدگی نامشخص به طوری است که پاسخ آن برابر با ۳۰ درصد پاسخ سازه سالم کنترل نشده باشد.

۳-۱- روش MIT

در طراحی کنترل کننده‌های تطبیقی علاوه بر حلقه‌ی اصلی مربوط به کنترل سازه، یک حلقه‌ی دیگر نیز وجود دارد که وظیفه تنظیم پارامترهای کنترل کننده با توجه به شرایط موجود است. روش MIT rule در واقع در اولین روش طراحی کنترل کننده‌های تطبیقی مدل مرجع است. از آن جهت که این روش اولین بار در یکی از آزمایشگاه‌های مؤسسه فناوری ماساچوست استفاده شد، به این نام مشهور شده است [۲۱]. برای طراحی این نوع کنترل کننده یک سیستم حلقه بسته با پارامترهای قابل تنظیم برای کنترل کننده θ در نظر گرفته می‌شود. هدف این است که تفاوت میان پاسخ سازه کنترل شده y با پاسخ سازه مطلوب و مرجع y_m کمینه شود. این مقدار خطا با e نمایش داده می‌شود. همان گونه که پیش‌تر اشاره شد، سازه مرجع در این حالت سازه‌ای است که پاسخ آن نسبت به سازه سالم ۷۰ درصد کاهش یافته

$$J = \frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2) \quad (۸)$$

در ادامه می‌توان با استفاده از روش MIT روابط لازم برای تنظیم پارامتر θ_1 را به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta_1} = -\gamma \left(\frac{\partial J}{\partial e_1} \frac{\partial e_1}{\partial \theta_1} + \frac{\partial J}{\partial e_2} \frac{\partial e_2}{\partial \theta_1} + \frac{\partial J}{\partial e_3} \frac{\partial e_3}{\partial \theta_1} \right) \quad (۹)$$

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma (e_1 \frac{\partial e_1}{\partial \theta_1} + e_2 \frac{\partial e_2}{\partial \theta_1} + e_3 \frac{\partial e_3}{\partial \theta_1}) \quad (۱۰)$$

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma (e_1 G_{11} m_1 u_c + e_2 G_{21} m_1 u_c + e_3 G_{31} m_1 u_c) \quad (۱۱)$$

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma m_1 u_c (e_1 G_{11} + e_2 G_{21} + e_3 G_{31}) \quad (۱۲)$$

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma' u_c (e_1 G_{11} + e_2 G_{21} + e_3 G_{31}) \quad (۱۳)$$

با تکرار فرآیند بالا در مورد پارامترهای θ_2 و θ_3 روابط زیر برای محاسبه آن‌ها به دست می‌آید.

$$\frac{d\theta_2}{dt} = -\gamma'' u_c (e_1 G_{12} + e_2 G_{22} + e_3 G_{32}) \quad (۱۴)$$

$$\frac{d\theta_3}{dt} = -\gamma''' u_c (e_1 G_{13} + e_2 G_{23} + e_3 G_{33}) \quad (۱۵)$$

در این تحقیق مقادیر γ ، γ' و γ'' برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شده‌اند. نیروی وارده به سازه واقعی در طبقه i ام باید برابر $\theta_i U_{ic}$ باشد. از آنجا که تحریک خارجی نیرویی به مقدار $m_i u_c$ به سازه وارد می‌کند، مابقی

که در آن U_i ورودی i ام سازه کنترل شده و U_{ic} ها ورودی i ام سازه مرجع می‌باشند. در اینجا به جای یک پارامتر قابل تنظیم، از یک بردار پارامترهای قابل تنظیم $[\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]$ باید استفاده شود. با فرض اینکه تابع انتقال چند ورودی-چند خروجی سازه‌های واقعی و مدل در فضای لاپلاس به ترتیب $[G]$ و $[G_m]$ باشند، معادله‌ی رابطه خطا به صورت زیر در می‌آید:

$$E = y - y_m = [G]_{3 \times 3} U - [G_m]_{3 \times 3} U_c = [G]_{3 \times 3} \begin{bmatrix} \theta_1 m_1 \\ \theta_2 m_2 \\ \theta_3 m_3 \end{bmatrix} u_c - [G_m]_{3 \times 3} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} u_c \quad (۴)$$

که در آن u_c نویز سفید وارد شده به سیستم و m_i جرم طبقه i ام است. با توجه به ابعاد مسئله، بردار خطا و ماتریس تابع انتقال چند ورودی چند خروجی سیستم به صورت روابط (۵) و (۶) در می‌آید:

$$E = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T \quad (۵)$$

$$[G] = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

برای محاسبه تابع تبدیل سیستم با استفاده از ماتریس‌های حالت سیستم، می‌توان از رابطه‌ی شماره (۷) استفاده کرد.

$$G(s) = C(sI - A)^{-1} B + D \quad (۷)$$

که در آن A ماتریس سیستم در نمایش فضای حالت، B ماتریس ورودی در نمایش فضای حالت، C ماتریس خروجی در نمایش فضای حالت و D ماتریس پیش‌خور در نمایش فضای حالت هستند. در این مسئله تابع هزینه را می‌توان به صورت معادله (۸) تعریف کرد. با توجه به وجود توان دوم مؤلفه‌های بردار خطا، برای به صفر رساندن تابع هزینه، الگوریتم کنترل تلاش می‌کند تا تک‌تک مؤلفه‌های خطا را صفر کند.

$$u = Mu_c - Lx \quad (20)$$

آن باید توسط کنترل کننده به سازه وارد شود. در نتیجه در هر لحظه نیروی کنترل را می‌توان از رابطه‌ی (۱۷) به دست آورد.

$$\theta_i m_i u_c = u_i + m_i u_c \quad (16)$$

پس از جای‌گذاری معادله (۲۱) در (۱۹) رفتار حلقه بسته سیستم به صورت معادله‌ی (۲۱) در خواهد آمد.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B(Mu_c - Lx) = \\ (A - BL)x + BMu_c &= A_c(\theta)x + B_c(\theta)u_c \end{aligned} \quad (21)$$

$$u_i = m_i u_c (\theta_i - 1) \quad (17)$$

۳-۲- طراحی کنترل کننده توسط روش پایداری لیاپانف

با توجه به تعداد درجات آزادی سازه و تعداد کنترل کننده‌ها ماتریس‌های M و L باید دارای ابعادی به صورت معادله‌های (۲۲) و (۲۳) باشند. و در حالت کلی تمام مولفه‌های آن‌ها می‌تواند شامل پارامترهای قابل تنظیم باشد. بنابراین در این حالت بردار پارامترهای قابل تنظیم دارای ۲۷ مولفه خواهد بود.

هیچ تضمینی وجود ندارد که کنترل کننده طراحی شده به روش MIT دارای پایداری باشد. به همین دلیل الگوریتم‌های کنترل تطبیقی مدل مرجع دیگری توسط محققان پیشنهاد شده است. استفاده از تئوری پایداری لیاپانف یکی از روش‌های طراحی کنترل کننده‌های مدل مرجع است. در این روش یک معادله دیفرانسیل از تابع خطا ساخته می‌شود که در آن خطا تفاوت خروجی به دست آمده با خروجی مدل مرجع است. به عبارت دیگر $e = y - y_m$. در معادله دیفرانسیل به دست آمده پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده وجود خواهند داشت. سپس از یک تابع پتانسیل لیاپانف دارای مشتق‌های مرتبه اول نیمه معین منفی جهت به صفر رساندن خطا استفاده می‌شود [۲۱].

یک سیستم را در نظر بگیرد که در فضای حالت به صورت معادله (۱۸) مدل‌سازی شده است.

$$M = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 \\ \theta_4 & \theta_5 & \theta_6 \\ \theta_7 & \theta_8 & \theta_9 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (18)$$

$$L = \begin{bmatrix} \theta_{10} & \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{13} & \theta_{14} & \theta_{15} \\ \theta_{16} & \theta_{17} & \theta_{18} & \theta_{19} & \theta_{20} & \theta_{21} \\ \theta_{22} & \theta_{23} & \theta_{24} & \theta_{25} & \theta_{26} & \theta_{27} \end{bmatrix} \quad (23)$$

همیشه این امکان وجود ندارد که بردار θ را به طوری تنظیم کرد که معادله‌های (۱۹) و (۲۱) یکسان شوند. اما یک شرط کافی آن است که حداقل یک بردار θ_0 وجود داشته باشد به طوری که:

که در آن x بردار حالت سیستم، \dot{x} مشتق بردار حالت سیستم نسبت به زمان و u بردار ورودی هستند. رفتار سازه‌ی مرجع با معادله‌ی (۱۹) مشخص شود:

$$A_c(\theta_0) = A_m \quad (24)$$

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m u_c \quad (19)$$

$$B_c(\theta_0) = B_m \quad (25)$$

هنگامی که این امکان وجود داشته باشد که تمام پارامترهای موجود در قانون کنترل به طور آزادانه انتخاب شود می‌توان نوشت که:

که زیرنویس‌های m نشان دهنده پارامترهای مربوط به سازه مدل هستند. یک قانون کنترل کلی را با استفاده از ماتریس‌های با ابعاد درست M و L را می‌توان به صورت زیر پیشنهاد داد:

سپس برای دست آوردن رابطه تنظیم پارامترها از تابع پتانسیل لیاپانف زیر استفاده می‌شود.

$$A - A_m = BL \quad (26)$$

$$V(e, \theta) = \frac{1}{2}(\gamma e^T P e + (\theta - \theta_0)^T (\theta - \theta_0)) \quad (34)$$

$$B_m = BM \quad (27)$$

که در معادله‌ی (۳۴) ماتریس P باید مثبت معین باشد که در این تحقیق برابر یک ماتریس همانی از مرتبه شش انتخاب شده است. مشتق زمانی معادله‌ی (۳۴) به صورت زیر است:

در نتیجه ماتریس‌های L و M را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد.

$$L = (B^T B)^{-1} B^T (A - A_m) = (B_m^T B)^{-1} B_m^T (A - A_m) \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & -\frac{\gamma}{2} e^T Q e + \gamma (\theta - \theta_0)^T \Psi^T P e + (\theta - \theta_0)^T \frac{d\theta}{dt} = \\ & -\frac{\gamma}{2} e^T Q e + (\theta - \theta_0)^T \left(\frac{d\theta}{dt} + \gamma \Psi^T P e \right) \end{aligned} \quad (35)$$

$$M = (B^T B)^{-1} B^T B_m = (B_m^T B)^{-1} B_m^T B_m \quad (29)$$

که در آن Q یک ماتریس مثبت معین است که در رابطه (۳۶) صدق می‌کند.

با در نظر گرفتن تابع خطا به صورت تفاوت میان بردار حالت سازه واقعی و سازه مرجع به صورت $e = x - x_m$ می‌توان معادله دیفرانسیل (۳۰) را برای مقدار خطا نوشت.

$$A_m^T P + P A_m = -Q \quad (36)$$

$$\frac{de}{dt} = \dot{x} - \dot{x}_m = Ax + Bu - A_m x_m - B_m u_m \quad (30)$$

با انتخاب روش تنظیم پارامتر به صورت رابطه‌ی (۳۷):

با اضافه و کم کردن عبارت $A_m x$ به سمت راست معادله (۳۰) داریم:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \Psi^T P e \quad (37)$$

$$\frac{de}{dt} = A_m e + (A - A_m - BL)x + (BM - B_m)u_c \quad (31)$$

مشتق زمانی $V(e, \theta)$ به صورت رابطه‌ی (۳۸) در می‌آید:

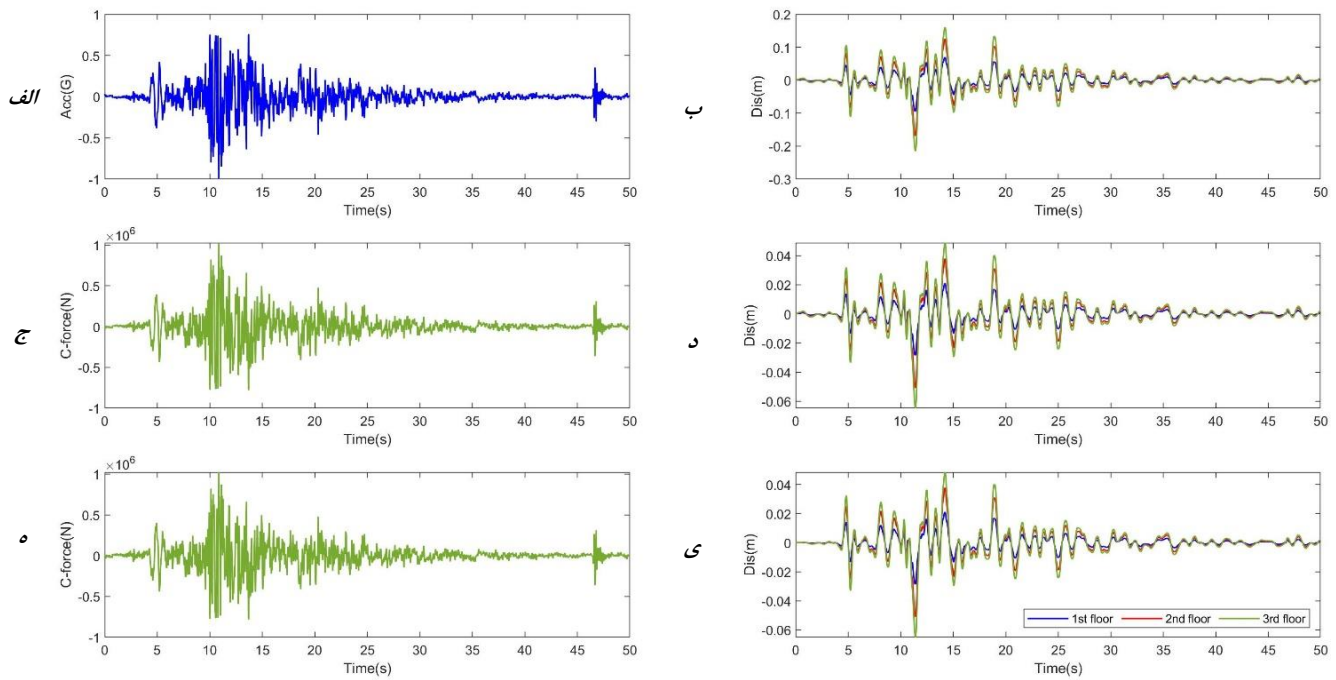
$$\frac{de}{dt} = A_m e + (A_c(\theta) - A_m)x + (B_c(\theta) - B_m)u_c \quad (32)$$

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{\gamma}{2} e^T Q e \quad (38)$$

که مشتق dV/dt منفی معین است. قابل اثبات است که در این صورت مقدار خطا به سمت صفر میل می‌کند [۲۱]. در اینجا هم فرض شده است که پاسخ سازه‌ی مرجع برابر یک ۳۰ درصد پاسخ سازه سالم کنترل نشده باشد. در این روش می‌توان با در نظر گرفتن ماتریس ورودی به شکل $B_m = 0.3B$ این کار را انجام داد.

از آنجایی که شرط کافی برای تعقیب کامل پاسخ سازه مرجع وجود دارد. سمت راست معادله‌ی (۳۲) را می‌توان به صورت تابعی از $(\theta - \theta_0)$ نوشت.

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \end{bmatrix}_{6 \times 1} = [A_m]_{6 \times 6} [e]_{6 \times 1} + [\Psi]_{6 \times 27} [(\theta - \theta_0)]_{27 \times 1} \quad (33)$$



شکل ۲. عملکرد سیستم کنترل در کاهش پاسخ سازه. الف) تاریخچه زمانی شتاب زلزله ب) تاریخچه زمانی جابه‌جایی سازه سالم کنترل نشده ج) تاریخچه زمانی نیروی کنترل تولید شده در الگوریتم MIT د) تاریخچه زمانی جابه‌جایی سازه کنترل شده با الگوریتم MIT ه) تاریخچه زمانی نیروی کنترل در روش لیاپانوف ی) تاریخچه زمانی جابه‌جایی سازه کنترل شده با الگوریتم پایداری لیاپانوف

Fig. 2. Performance of the controller for attenuating the structural response: top-left) earthquake time history top-right) displacement time history of the uncontrolled structure middle-left) control force time history of the MIT rule controller middle-right) displacement time history of controlled structure with MIT controller bottom-left) control force time history of the Lyapunov stability theorem controller bottom-right) displacement time history of controlled structure with Lyapunov controller

روش‌های پردازش سیگنال ضروری هستند. به کمک این روش‌ها می‌توان خرابی احتمالی موجود در سازه و در بعضی روش‌ها نوع، شدت و محل آن را نیز می‌توان تشخیص داد. روش‌های پردازش سیگنال متفاوتی در حیطه پایش سلامت سازه‌ها استفاده شده‌اند. از میان روش‌های پرکاربرد می‌توان به روش‌های آماری سری‌های زمانی، تبدیل فوریه و تبدیل موجک اشاره کرد. استفاده از سری‌های زمانی جزو اولین و پرکاربردترین روش‌های استفاده شده در فرآیندهای تشخیص خرابی هستند [۲]. در این تحقیق، روش خود همبسته که مشهورترین روش در بین روش‌های آماری بررسی سری‌های زمانی است، برای استخراج مشخصه‌های حساس به آسیب استفاده شده است.

۴-۱- مدل خود همبسته

روش خود همبسته به طور وسیع برای کاربردهای پایش سلامت سازه توسط محققان استفاده شده و کارایی و عملکرد آن اثبات شده است. در دو دهه اخیر ویژگی‌های حساس به آسیب زیادی با استفاده از مدل‌های خود

الگوریتم‌های کنترل بیان شده در بالا در نرم‌افزارهای MATLAB و Simulink مدل‌سازی شده‌اند. جهت مشاهده تاریخچه زمانی نیروهای کنترل سازه و همچنین اثر سیستم کنترلی در کاهش پاسخ سازه، سازه در حالت سالم با یک رکورد زلزله تحریک شده است و نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل نمودار تاریخچه زمانی شتاب زلزله، پاسخ سازه کنترل نشده، نیروهای کنترل محاسبه شده از هر دو روش و همچنین پاسخ سازه کنترل شده در تمام طبقات ترسیم شده است.

۴- پردازش سیگنال

اساس پایش سلامت سازه بر اساس داده‌های حاصل از ارتعاشات سازه پردازش سیگنال است [۲]. بروز خرابی در سازه باعث ایجاد تغییر در مشخصات ذاتی سازه و در نتیجه تغییر پاسخ دینامیکی آن می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که خرابی سازه مشخصات آماری پاسخ را تغییر می‌دهد [۲۲]. برای استخراج مشخصات حساس به خرابی از پاسخ‌های سازه

تصادفی دارای توزیع نرمال در نظر گرفته می‌شود.

دقت یک مدل خود همبسته توسط مرتبه‌ی آن مشخص می‌شود. واضح است که هر چه مرتبه‌ی مدل بالاتر باشد سری‌های زمانی پیچیده‌تری را می‌توان با استفاده از این روش تقریب زد. در مقابل شانس بیش برآزش نیز بیشتر شده و هزینه محاسباتی برای به دست آوردن مدل نیز بالا می‌رود. یکی از معیارهای موجود در ادبیات فنی برای تعیین بهینه مرتبه مدل خود همبسته استفاده از رابطه‌ی آکایکه است [۲۶]. این رابطه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$AIC(p) = N \ln(\sigma_p^2) + 2p \quad (40)$$

که در آن p مرتبه‌ی مدل، n تعداد کل گام‌های زمانی موجود، $N = n - p$ تعداد مشاهداتی است که برای محاسبه پارامترهای مدل استفاده شده است و σ_p^2 واریانس مقدار خطاها در برآورد مدل است. پس از محاسبه معیار آکایکه برای مرتبه‌های مختلف مدل، مرتبه‌ای که کمترین مقدار معیار آکایکه را دارا باشد به عنوان مرتبه بهینه مدل انتخاب می‌شود. در واقع این معیار تلاش می‌کند تا توازن بین مقدار پیچیدگی و دقت مدل برقرار کند [۲۷]. اگر درجه‌ی مدل بسیار کوچک انتخاب شود واریانس خطاهای پیش‌بینی یعنی اولین ترم سمت راست معادله‌ی (۴۰) افزایش می‌یابد. در صورتی که درجه‌ی مدل بسیار بزرگ انتخاب شود دقت بالا می‌رود ولی پیچیدگی محاسباتی نیز زیادتر می‌شود و باعث افزایش ترم دوم سمت راست معادله (۴۰) می‌شود.

۵- الگوریتم‌های طبقه‌بندی یادگیری ماشین

هدف استفاده از روش‌های طبقه‌بندی در این نوشتار، طبقه‌بندی داده‌های مجهول حاصل از ضرایب مدل خود همبسته به یکی از سناریوهای خرابی از پیش تعریف شده است. برای این مسئله خاص چند الگوریتم طبقه‌بندی شامل درخت تصمیم، آنالیز افتراقی، ماشین‌های بردار پشتیبان و طبقه‌بندی ترکیبی آزمایش شده است. نتایج نشان داده است که استفاده از روش آنالیز افتراقی نسبت به سایر روش‌ها برای این مسئله دارای دقت بالاتری است. برای مقایسه کارایی روش آنالیز افتراقی با روش‌های دیگر طبقه‌بندی مبتنی بر یادگیری ماشین دقت مدل آموزش داده شده برای چند روش مختلف در جدول ۳ آورده شده است. داده‌های به کار برده شده از نیروی کنترل به دست آمده از روش MIT در حالت سالم و همه سناریوهای خرابی هستند و از ۵۰

همبسته سری‌های زمانی توسعه یافته است که در حالت کلی آن‌ها را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. در گروه اول تحقیقاتی جای دارند که از با استفاده از ضرایب مدل‌های خود همبسته فرآیند تشخیص خرابی انجام می‌شود. در گروه دوم تحقیقاتی قرار می‌گیرند که از بخش باقی‌مانده یا خطای این مدل‌ها جهت تشخیص خرابی استفاده کرده‌اند [۲۴ و ۲۳]. مطالعات نشان داده است که استفاده از ضرایب عملکرد مناسب‌تری دارد [۲۴]. به همین دلیل در این مقاله از ضرایب مدل خود همبسته به عنوان مشخصه‌های حساس به آسیب استفاده شده است. نمونه‌های بسیاری از استفاده‌های موفق از مدل‌های خود همبسته برای شناسایی آسیب در سازه‌ها در ادبیات فنی موجود است. نیر و همکاران [۲۲] روشی را بر مبنای استفاده از ضرایب مدل خود همبسته برای شناسایی آسیب و محل آن در یک قاب فولادی چهار طبقه پیشنهاد دادند. آن‌ها از اندازه اولین ضریب مدل خود همبسته تقسیم بر مجموع مربعات ضرایب اول تا سوم به عنوان یک مشخصه حساس به خرابی استفاده کردند. دتو و همکاران [۲۵] یک روش آنالیز حساسیت کلی و گسترش عدم قطعیت بین تغییر در خصوصیات دینامیکی یک سیستم و تغییرات حاصل در مدل همبسته توصیف کننده‌ی پاسخ آن انجام دادند. آن‌ها اثبات کردند که ضرایب مدل خود همبسته وابسته به مشخصات دینامیکی سیستم هستند. همچنین آن‌ها نشان دادند که ضرایب مدل‌های خود همبسته که برای توصیف سری زمانی پاسخ سازه استفاده می‌شوند نسبت به تغییرات در فرکانس طبیعی بیشتر از تغییرات در میرایی سازه حساس هستند.

در آنالیز آماری یکی از راه‌های توصیف فرآیندهای تصادفی، نشان دادن یک سری زمانی به صورت ضرایبی از مقادیر خود آن در گام‌های زمانی قبل‌تر است. به این دلیل به آن مدل خود همبسته گفته می‌شود که در آن مقدار سیگنال در گام زمانی t_n به صورت مجموع یک ترکیب خطی از مقادیر خود سیگنال در گام‌های زمانی $t_{n-1}, t_{n-2}, \dots, t_{n-p}$ و همچنین یک عبارت خطا با توزیع نرمال نوشته می‌شود. به زبان ریاضی برای توصیف سیگنال X با استفاده از یک خود همبسته مرتبه‌ی p که با عبارت $AR(p)$ نشان داده می‌شود از رابطه (۳۹) استفاده می‌شود.

$$X_t = \sum_{k=1}^p \alpha_k X_{t-k} + \varepsilon_t \quad (39)$$

که در آن ضرایب α_k ضرایب AR هستند. و ترم ε_t نشان دهنده خطای بین مقدار محاسبه شده و مقدار واقعی است و به عنوان یک متغیر

جدول ۳. دقت روش‌های مختلف طبقه‌بندی برای داده‌های سری زمانی حاصل از نیروی کنترل به دست آمده از روش MIT-

Table 3. Comparison of the accuracy of different classification algorithms for features derived from the MIT rule control force time histories

روش طبقه‌بندی	درخت تصمیم	آنالیز افتراقی		ماشین‌های بردار پشتیبان			K نزدیک‌ترین همسایه
		خطی	درجه دوم	خطی	درجه دوم	درجه سوم	
دقت روش	۰/۱۲	۰/۲۲	۰/۹۷	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۵

هستند. در توزیع نرمال چند متغیره، هر کدام از متغیرها خود دارای یک توزیع نرمال یک متغیره هستند و بین متغیرهای مختلف نیز ارتباط وجود که با ماتریس کوواریانس مشخص می‌شود. توزیع نرمال چند متغیره با عبارت $X \sim N(\mu, \Sigma)$ نشان داده می‌شود که در آن μ بردار میانگین و Σ ماتریس کوواریانس هستند.

تابع چگالی احتمال در توزیع نرمال چند متغیره به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(x) = \frac{1}{(2\pi)^{p/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - \mu)^T \Sigma^{-1}(x - \mu)\right) \quad (42)$$

پس از جای‌گذاری تابع چگالی توزیع احتمال بر اساس رابطه‌ی (۴۲) در معادله‌ی (۴۱) احتمال پسین $P(C = k | X = x)$ به دست می‌آید. پس از آن داده‌ی مجهول به دسته‌ای تعلق می‌گیرد که برای آن دسته مقدار احتمال $P(C = k | X = x)$ بیشتر از دسته‌های دیگر باشد. با گرفتن لگاریتم از طرفین معادله‌ی (۴۱) و حذف کردن عباراتی که تابع شماره کلاس k نیستند معلوم می‌شود که داده‌ها به دسته‌ای تعلق می‌گیرند که امتیاز افتراقی آن یعنی δ_k حداکثر باشد.

$$\delta_k(x) = x^T \Sigma^{-1} \mu_k - \frac{1}{2} \mu_k^T \Sigma^{-1} \mu_k + \log P_k \quad (43)$$

مرزهای به دست آمده از معادله‌ی (۴۳) خطی هستند به همین علت به روش فوق آنالیز افتراقی خطی نیز گفته می‌شود. آنالیزهای افتراقی دیگر را می‌توان با استفاده از فرض‌ها مختلف در مورد ماتریس کوواریانس

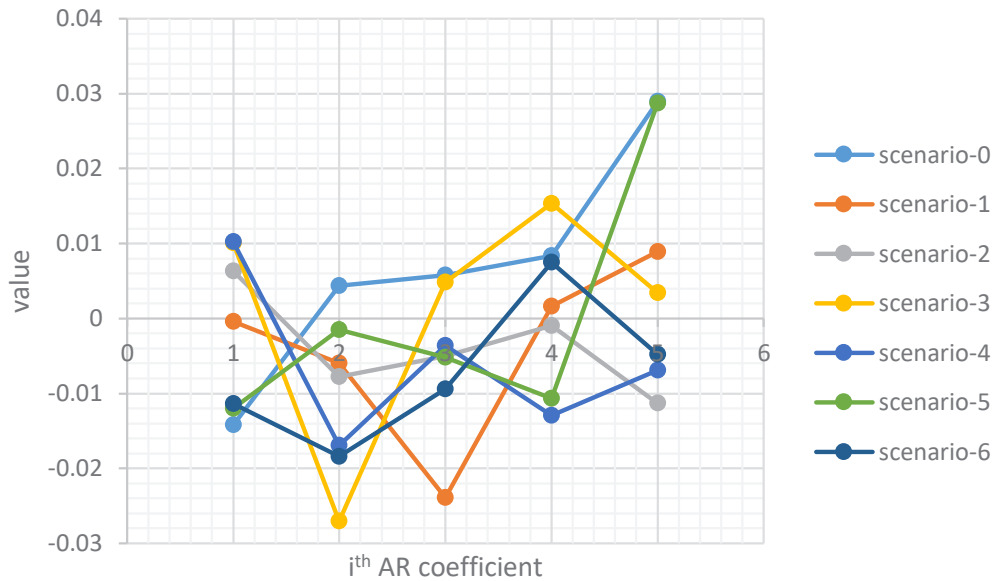
عدد تحریک نوپز سفید متفاوت برای تحریک سازه استفاده شده است. در اینجا همه‌ی سناریوها به صورت یک باره مورد استفاده قرار گرفته‌اند و هدف آموزش روش طبقه‌بندی‌ای است که بتواند هفت دسته مجزا را تقسیم‌بندی کند.

۵-۱- آنالیز افتراقی

یکی از روش‌هایی طبقه‌بندی‌ای که در مسائل مربوط به شناسایی آسیب سازه‌ها مورد توجه محققان قرار گرفته است، روش آنالیز افتراقی است [۲۹ و ۲۸]. این روش بر مبنای آمار و احتمالات چند متغیره کار می‌کند. آنالیز افتراقی یکی از روش‌های دسته‌بندی داده‌ها به چند کلاس بر اساس قانون بیز است. فرض کنید هدف طبقه‌بندی یک داده‌ی مشاهده شده به یکی از K کلاس از پیش تعیین شده باشد. اگر احتمال پیشین اینکه یک داده که به صورت تصادفی انتخاب شده است متعلق به کلاس k باشد را با P_k نشان دهیم، و $x \in \mathfrak{R}^n$ داده مشاهده شده باشد با استفاده از قانون بیز احتمال اینکه داده مشاهده شده به کلاس k تعلق داشته باشد برابر است با:

$$P(C = k | X = x) = \frac{P(X = x | C = k)P_k}{\sum_{i=1}^K P_i P(X = x | C = i)} \quad (41)$$

در معادله (۴۱) مخرج سمت راست در واقع احتمال $P(X = x)$ است که با استفاده از قانون احتمال کل به صورت افراز روی تمام کلاس‌ها نوشته شده است. برای محاسبه احتمال شرطی $P(X = x | C = k)$ فرض می‌شود که داده‌های مشاهده شده‌ی $X = (X_1, X_2, \dots, X_p)$ دارای یک توزیع نرمال چند متغیره هستند و دارای ماتریس کوواریانس مشترکی



شکل ۳. ضرایب مدل خود همبسته مرتبه پنج برای نیروی طبقه اول محاسبه شده با الگوریتم MIT تحت تحریک خارجی نویز سفید

Fig. 3. AR (5) coefficients of the first floor control force time history excited with white gaussian noise and using MIT rule controller.

ضرایب وابسته به وضعیت خرابی سازه هستند. یک نمونه از مقدار ضرایب مدل خود همبسته و نحوه تغییر برای سناریوهای خرابی مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است.

تشخیص وجود خرابی، محل خرابی، نوع خرابی، شدت خرابی و مقدار عمر باقی مانده سازه پنج مرحله مهم در پایش سلامت سازه‌ها هستند [۳۰] و توانایی یک روش در پایش سلامت سازه بر اساس توانایی و دقت آن در انجام هر یک از مراحل بالا تعیین می‌شود. روش پیشنهادی در این مقاله به طور جداگانه برای تشخیص خرابی، تعیین محل خرابی و شدت خرابی بررسی شده است. در هر مرحله با انتخاب دسته داده‌های مناسب از نیرو کنترل‌های مربوط به سازه سالم و سناریوهای مختلف خرابی، یک مدل یادگیری ماشین بر اساس طبقه‌بندی افتراقی درجه دو آموزش داده شده است.

۶-۱- تشخیص خرابی

ضرایب مدل خود همبسته برای نیروی کنترل‌های محاسبه شده در سازه‌ی سالم و سازه آسیب دیده برای آموزش الگوریتم طبقه‌بندی استفاده شده است تا دقت و عملکرد روش پیشنهادی برای شناسایی آسیب در سازه مشخص شود. به این منظور ابتدا داده‌های مربوط به خرابی سازه در طبقه اول یعنی سناریوهای اول و چهارم به همراه داده‌های مربوط به حالت

ساخت. به عنوان مثال، در آنالیز افتراقی درجه دوم^۱ فرض می‌شود که داده‌ها دارای توزیع نرمال چند متغیره هستند ولی برخلاف حالت پیشین ماتریس کوواریانس بین دسته‌های مختلف یکسان فرض نمی‌شود. با این فرض امتیاز افتراقی به صورت رابطه‌ی (۴۴) درمی‌آید.

$$\delta_k(x) = -\frac{1}{2}(x - \mu)^T \Sigma_k^{-1}(x - \mu) - \frac{1}{2} \log(|\Sigma_k|) + \log P_k \quad (44)$$

در این مقاله از آنالیز افتراقی درجه دوم برای کلاس‌بندی داده‌ها استفاده شده است. همچنین برای جلوگیری از وقوع بیش برآزش از روش اعتبارسنجی متقابل k-fold با تقسیم داده‌ها به پنج دسته استفاده شده است.

۶-۲ تشخیص خرابی، شدت و محل آن

از آنجایی که ضرایب مدل‌های خود همبسته تاریخچه زمانی یک سیگنال را با استفاده از تعداد بسیار کمی داده توصیف می‌کند، منطقی به نظر می‌رسد که برای تشخیص تفاوت‌های دو سیگنال مختلف از ضرایب به دست آمده از این مدل‌ها استفاده کرد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اندازه

1 Quadratic Discriminant Analysis (QDA)

جدول ۴. دقت مدل طبقه‌بندی برای شناسایی وجود آسیب احتمالی در سازه

Table 4. Accuracy of the trained classifiers for detecting potential damage in the structure

اسم مدل	کارکرد مدل	دیتاست	دقت برای روش کنترلی	
			لیاپانف	MIT
MDL-1	تشخیص خرابی احتمالی در طبقه اول	آموزش	۰/۹۸	۰/۹۹
		تست	۱	۱
MDL-2	تشخیص خرابی احتمالی در طبقه دوم	آموزش	۱	۱
		تست	۱	۱
MDL-3	تشخیص خرابی احتمالی در طبقه سوم	آموزش	۱	۱
		تست	۱	۱

دقت مدل‌های فوق در تشخیص خرابی در هر یک از طبقات برای داده‌های تست و آموزش در جدول ۴ نشان داده شده است. دقت به صورت نسبت تشخیص‌های درست مدل نسبت به تعداد کل داده‌ها محاسبه شده است.

۶-۲- تعیین محل خرابی

پس از بررسی کردن یک داده‌ی مجهول با سه مدل فوق برای بررسی وجود آسیب احتمالی، در صورتی که هر سه مدل داده‌ها را مربوط به سازه سالم طبقه‌بندی کنند، داده ناشناس به عنوان سازه سالم پذیرفته می‌شود. اما اگر حداقل یکی از مدل‌های فوق داده‌ها را مربوط به حالت آسیب دیده شناسایی کند نیاز به مدل دیگری است تا محل خرابی در سازه مشخص شود. به همین منظور یک مدل طبقه‌بندی دیگر به نام MDL-4 ساخته شده است که وظیفه آن تشخیص محل خرابی در سازه است. برای آموزش این مدل سه دسته داده استفاده شده است. دسته اول مربوط به داده‌های دارای آسیب در طبقه اول است یعنی سناریوهای اول و چهارم. داده‌های سناریوهای دوم و پنجم که مربوط به آسیب در طبقه دوم هستند دسته دوم از داده‌های آموزش را تشکیل می‌دهند و در نهایت از داده‌های سناریوهای سوم و ششم به عنوان داده‌های حاوی خرابی در طبقه سوم به عنوان دسته آخر استفاده شده است. دقت این مدل برای تشخیص محل خرابی برای داده‌های آموزش و تست در جدول ۵ نشان داده شده است.

سالم سازه برای آموزش الگوریتم طبقه‌بندی استفاده شده است. این مدل MDL-1 نامیده شده است. داده‌های ورودی به مدل در این حالت دو کلاس هستند. کلاس اول مربوط به داده‌های سالم است و کلاس دوم مربوط به سازه‌ی آسیب دیده در طبقه اول که سناریوهای اول و چهارم را شامل می‌شود، است. به همین ترتیب داده‌های مربوط به خرابی در ستون‌های طبقه دوم سازه یعنی سناریوهای دوم و پنجم به همراه داده‌های مربوط به سازه سالم برای آموزش یک مدل برای تشخیص خرابی در طبقه دوم استفاده شده است. این مدل MDL-2 نامیده شده است. همچنین داده‌های مربوط به وجود آسیب در طبقه سوم یعنی سناریوهای سوم و ششم به همراه داده‌های مربوط به سازه سالم برای آموزش مدل MDL-3 که وظیفه تشخیص خرابی در طبقه سوم را دارد، استفاده شده است.

نیروی کنترل در هر سناریو خرابی ۵۰ مرتبه برای تحریک‌های نوین سفید متفاوت محاسبه شده است؛ بنابراین در هر یک از سه مدل طبقه‌بندی فوق ۱۵۰ داده لیبیل دار وجود دارد که ۱۰۰ داده مربوط به حالت آسیب دیده و ۵۰ داده مربوط به حالت سالم سازه هستند. برای آموزش الگوریتم طبقه‌بندی از ۸۰ درصد داده‌های موجود استفاده شده است و ۲۰ درصد باقی‌مانده جهت بررسی دقت مدل ساخته شده به کار گرفته شده‌اند. با توجه به معیار AIC برای نیروی کنترل در حالات مختلف از مدل‌های خود همبسته مرتبه سه استفاده شده است. از آنجا که سه نیروی کنترل متفاوت در سه طبقه وجود دارد بردار مشخصه‌ها شامل نه مؤلفه است، یعنی سه برابر مرتبه مدل است.

جدول ۵. دقت مدل طبقه‌بندی پیشنهادی برای شناسایی محل آسیب در سازه

Table 5. Accuracy of the trained classifiers for determining damage location in the structure

اسم مدل	کارکرد مدل	دیتاست	دقت برای روش کنترلی	
			لیاپانف	MIT
MDL-4	تشخیص محل	آموزش	۰/۹۹	۰/۹۸
	خرابی	تست	۰/۹۸	۰/۹۲

۷- بررسی نتایج

۶-۳- تعیین شدت خرابی

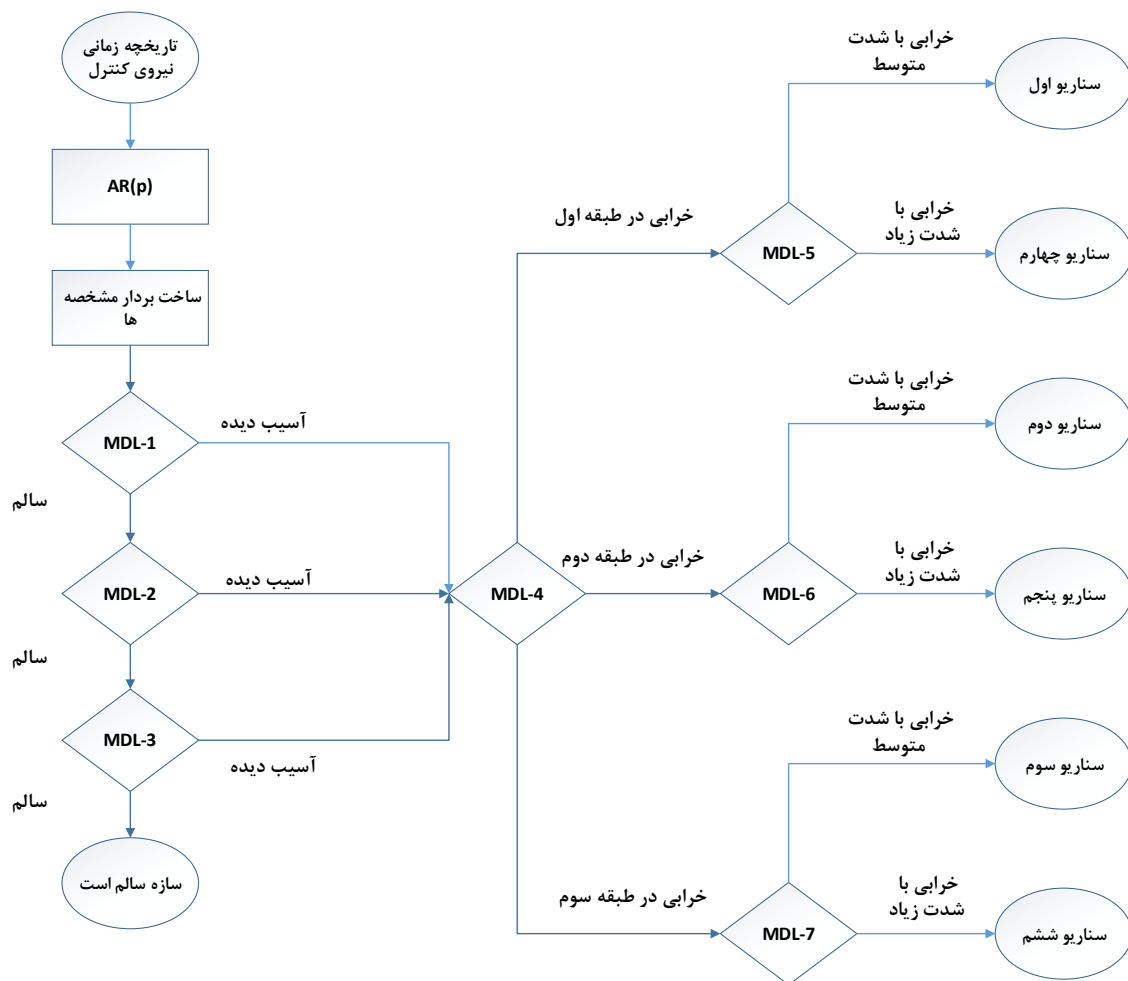
در قسمت قبل نتایج بررسی عددی مدل پیشنهادی بر روی یک سازه برشی سه طبقه برای دو حالت کنترلی متفاوت بررسی شد. نتایج نشان دهنده این است که روش پیشنهادی دقت بسیار بالایی در تشخیص خرابی احتمالی، محاسبه محل خرابی و شدت آن را دارا است. همچنین با توجه به اینکه از روش راستی آزمایی متقابل در هنگام آموزش مدل‌ها استفاده شده است، دقت مدل‌های طبقه‌بندی برای داده‌های تست و آموزش تقریباً یکسان است. برای نمایش کارایی نهایی مدل ارائه شده در این مقاله برای شناسایی آسیب در سازه نتیجه داده‌های تست برای هر دو الگوریتم کنترلی در شکل ۵ به صورت ماتریس‌های در هم ریختگی نشان داده شده است. نمودارهای به دست آمده حاصل از آزمایش داده‌های با وضعیت خرابی نامعلوم با استفاده از مدل‌های آموزش داده شده است. با توجه به خروجی مدل‌ها و استفاده از فلوجارت پیشنهادی وضعیت سازه معلوم می‌شود. اعداد روی محور عمودی نشانگر سناریوهای خرابی صحیح و اعداد محور افقی نشان دهنده خروجی مدل است. اعداد نوشته شده در داخل مربع‌ها نشان دهنده تعداد داده‌هایی هستند که دارای وضعیت واقعی و تخمین زده خاصی هستند. همان‌طور که از شکل مشخص است برای هر حالت از ده تحریک متفاوت به عنوان داده تست استفاده شده است. داده‌هایی که روی قطر قرار گرفته‌اند به این معنی هستند که سیستم طبقه‌بندی وجود خرابی، محل و شدت را به درستی تعیین کرده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده دقت صد در صدی مدل در تشخیص خرابی در مورد داده‌های تست است. اما در مورد تشخیص محل و شدت خرابی، الگوریتم پیشنهادی در کنترل کننده MIT پنج مورد از ۷۰ مورد و در کنترل کننده لیاپانف دو مورد از ۷۰ مورد دارای خطا هستند.

پس از تشخیص وجود خرابی احتمالی در سازه و یافتن محل آن، باید نوع و شدت خرابی تشخیص داده شود. نوع خرابی بر اساس نوع و کاربری سازه می‌تواند متفاوت باشد. به عنوان مثال در یک پل آبستستگی پایه‌های پل، خوردگی در تیرها و ستون‌ها بر اثر عوامل محیطی و ترک خوردگی می‌تواند نوع خرابی باشد. در یک سازه ساختمانی شل شدن پیچ‌های اتصالات، کماتش ستون‌ها، ترک خوردگی و کاهش سختی ستون‌ها بر اثر آتش‌سوزی می‌تواند انواع مختلف خرابی باشد. پس از تعیین محل خرابی (المان یا المان‌های سازه‌ای آسیب دیده)، به روش‌های مبتنی بر ارتعاشات سازه، با روش‌های دیگری مانند بازدید چشمی، از نوع خرابی می‌توان اطلاع یافت. در صورتی که با استفاده از بازدید چشمی نوع خرابی قابل تشخیص نباشد مانند وجود ترک‌های بسیار ریز می‌توان از روش‌های دیگری مانند، روش‌های آکوستیک و التراسونیک، روش‌های مبتنی بر میدان‌های مغناطیسی، رادیوگرافی و میدان‌های حرارتی استفاده کرد [۳۱]. از آنجایی که در این مطالعه نوع همه خرابی‌ها از دست رفتن سختی جانبی ستون‌ها در نظر گرفته شده است، نیازی به تشخیص نوع خرابی نیست اما باید شدت خرابی را برای داده‌ی مجهول تعیین کرد. به این منظور از دو سطح خرابی مربوط به هر طبقه در آموزش یک مدل برای تعیین شدت خرابی آن طبقه استفاده شده است. داده‌های سناریو اول و سناریو چهارم به عنوان دو شدت مختلف خرابی در طبقه اول برای ساخت مدل MDL-5 استفاده شده است. به همین ترتیب مدل‌های MDL-6 و MDL-7 به ترتیب برای تشخیص خرابی در طبقات دوم و سوم استفاده شده‌اند. دقت این مدل‌ها برای داده‌های آموزش و تست در جدول ۶ نشان داده شده است. همچنین به منظور واضح‌تر شدن ترتیب استفاده از مدل‌ها فلوجارت این روش پیشنهادی در شکل ۴ آورده شده است.

جدول ۶. دقت مدل طبقه‌بندی پیشنهادی برای شناسایی شدت آسیب در سازه

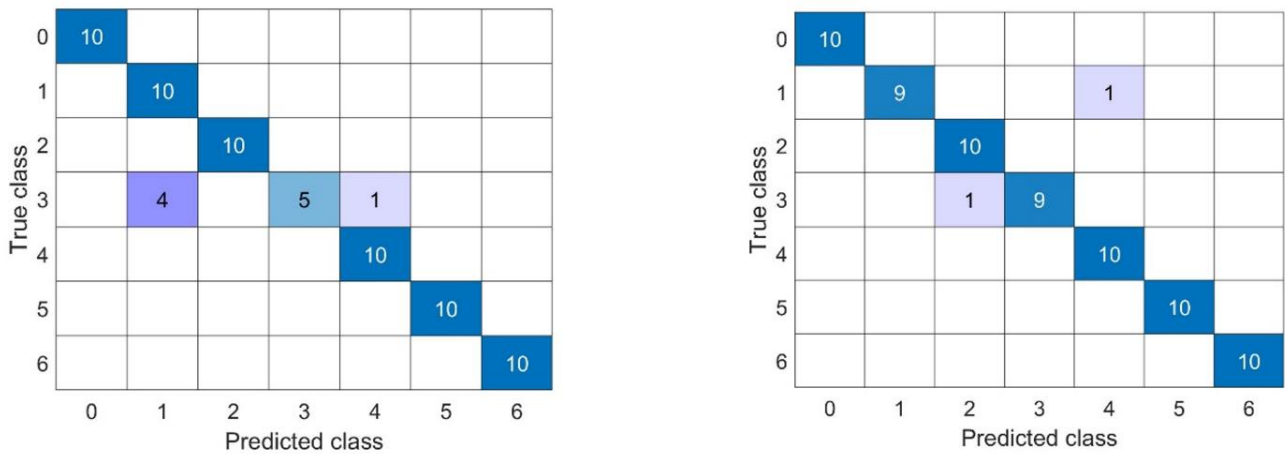
Table 6. Accuracy of the trained classifiers for calculating the damage severity in the structure

اسم مدل	کارکرد مدل	دیتاست	دقت برای روش کنترلی	
			لیاپانف	MIT
MDL-5	تشخیص شدت خرابی در طبقه اول	آموزش	۰/۹۸	۰/۹۹
		تست	۱	۱
MDL-6	تشخیص شدت خرابی در طبقه دوم	آموزش	۱	۱
		تست	۱	۱
MDL-7	تشخیص شدت خرابی در طبقه سوم	آموزش	۱	۱
		تست	۱	۱



شکل ۴. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص خرابی، محل و شدت آن

Fig. 4. Flowchart of the proposed algorithm for detecting, locating and, quantifying damage



شکل ۵. ماتریس در هم ریختگی مربوط به داده‌های تست به دست آمده از خروجی مدل‌ها الف) کنترل کننده MIT ب) کنترل کننده لیاپانف

Fig.5. Confusion matrices for the test dataset left) for the MIT controllers right) for the Lyapunov controllers

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، روش جدیدی برای پایش سلامت سازه‌های کنترل شده‌ی فعال ارائه شد. برای بررسی عددی عملکرد روش ارائه شده، یک سازه سه طبقه به صورت قاب برشی با کنترل کننده‌های فعال در هر سه طبقه مدل‌سازی شده و نیروهای کنترل به دست آمده است. سپس با استفاده از مدل‌های خود همبسته، مشخصه‌های حساس به خرابی از نیروهای کنترل استخراج شده و توسط روش آنالیز افتراقی درجه دوم کلاس‌بندی شده‌اند. نتایج بیانگر این موضوع است که روش پیشنهادی همه‌ی حالت‌های سالم را به درستی سالم طبقه‌بندی می‌کند و همه‌ی حالت‌های آسیب دیده را جزو دسته‌های آسیب دیده تقسیم‌بندی می‌کند. در مورد داده‌هایی که تعیین شرایط سازه در آن‌ها اشتباه صورت گرفته است این مسئله قابل ذکر است که در آن‌ها سازه‌ی آسیب دیده، به درستی آسیب دیده تشخیص داده شده است و تنها محل و شدت به درستی تعیین نشده است. از آنجا که بعد از تشخیص خرابی در سازه باید جهت ایمن‌سازی و ترمیم سازه اقداماتی انجام داد این مورد از اهمیت بالایی برخوردار است.

در این مقاله کنترل کننده‌ها به صورت ایده آل در نظر گرفته شده‌اند و اثرات تأخیر زمانی و محدود نیرو اعمالی در آن‌ها دیده نشده است. در نظر گرفتن این عوامل می‌تواند موضوع تحقیقات آینده در این زمینه باشد.

۹- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	ماتریس سیستم در نمایش فضای حالت
B	ماتریس ورودی در نمایش فضای حالت
C	ماتریس خروجی در نمایش فضای حالت
D	ماتریس پیش‌خور در نمایش فضای حالت
e	خطای بین پاسخ مدل و سازه
E	بردار خطای بین پاسخ سازه و مدل
G	تابع تبدیل سیستم در فضای لاپلاس
J	تابع هزینه
K	سختی طبقه N/m
m	جرم طبقه kg
n	تعداد گام‌های زمانی مدل خود همبسته
p	مرتبه مدل خود همبسته
P	احتمال
u	نیروی کنترل N
U	تحریک خارجی N
V	تابع پتانسیل لیاپانف
x	بردار حالت سیستم
X	سیگنال فضای زمان

of Sound and Vibration, 227(5) (1999) 987-1002.

- [10] V. Gattulli, F. Romeo, Integrated procedure for identification and control of MDOF structures, Journal of engineering mechanics, 126(7) (2000) 730-737.
- [11] Y.L. Xu, B. Chen, Integrated vibration control and health monitoring of building structures using semi-active friction dampers: Part I—methodology, Engineering Structures, 30(7) (2008) 1789-1801.
- [12] B. Chen, Y.L. Xu, Integrated vibration control and health monitoring of building structures using semi-active friction dampers: part II—numerical investigation, Engineering Structures, 30(3) (2008) 573-587.
- [13] S. Nagarajaiah, Adaptive passive, semiactive, smart tuned mass dampers: identification and control using empirical mode decomposition, Hilbert transform, and short-term Fourier transform, Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures, 16(7-8) (2009) 800-841.
- [14] M. Bitaraf, L.R. Barroso, S. Hurlebaus, Adaptive control to mitigate damage impact on structural response, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 21(6) (2010) 607-619.
- [15] Y. Ding, S. Law, Integration of structural control and structural evaluation for large scale structural system, in: Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2011, International Society for Optics and Photonics, 2011, pp. 797724.
- [16] Q. Huang, Y.L. Xu, J. Li, Z. Su, H. Liu, Structural damage detection of controlled building structures using frequency response functions, Journal of Sound and Vibration, 331(15) (2012) 3476-3492.
- [17] Y.L. Xu, Q. Huang, S. Zhan, Z. Su, H. Liu, FRF-based structural damage detection of controlled buildings with podium structures: Experimental investigation, Journal of Sound and Vibration, 333(13) (2014) 2762-2775.
- [18] K. Karami, F. Amini, Decreasing the damage in smart structures using integrated online DDA/ISMP and semi-

علائم یونانی

ρ چگالی، kg/m^3

δ امتیاز افتراقی

θ پارامتر قابل تنظیم کنترل کننده

μ میانگین

σ انحراف معیار

Σ ماتریس کوواریانس

زیرنویس

m سازه مدل

i شماره طبقه

منابع

- [1] Y.-L. Xu, J. He, Smart civil structures, CRC Press, 2017.
- [2] J.P. Amezquita-Sanchez, H. Adeli, Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures, Archives of Computational Methods in Engineering, 23(1) (2016) 1-15.
- [3] C.R. Farrar, K. Worden, Structural health monitoring: a machine learning perspective, John Wiley & Sons, 2012.
- [4] B. Spencer Jr, S. Nagarajaiah, State of the art of structural control, Journal of structural engineering, 129(7) (2003) 845-856.
- [5] T. Kobori, Past, present and future in seismic response control in civil engineering structures, in: Proc., 3rd World Conf. on Structural Control, 2003.
- [6] T. Soong, B. Spencer Jr, Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice, Engineering structures, 24(3) (2002) 243-259.
- [7] J. He, Y.-L. Xu, S. Zhan, Q. Huang, Structural control and health monitoring of building structures with unknown ground excitations: experimental investigation, Journal of Sound and Vibration, 390 (2017) 23-38.
- [8] S.S. Rao, M. Sunar, Piezoelectricity and Its Use in Disturbance Sensing and Control of Flexible Structures: A Survey, Applied Mechanics Reviews, 47(4) (1994) 113-123.
- [9] L.R. Ray, L. Tian, Damage detection in smart structures through sensitivity enhancing feedback control, Journal

- structures, Mechanical Systems and Signal Processing, 31 (2012) 355-368.
- [25] A. Datteo, G. Busca, G. Quattromani, A. Cigada, On the use of AR models for SHM: a global sensitivity and uncertainty analysis framework, Reliability Engineering & System Safety, 170 (2018) 99-115.
- [26] H. Akaike, A new look at the statistical model identifications, IEEE transactions on automatic control, 19 (1974) 716-723.
- [27] E. Figueiredo, J. Figueiras, G. Park, C.R. Farrar, K. Worden, Influence of the autoregressive model order on damage detection, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 26(3) (2011) 225-238.
- [28] R.A. Fisher, The use of multiple measurements in taxonomic problems, Annals of eugenics, 7(2) (1936) 179-188.
- [29] G.J. McLachlan, Discriminant analysis and statistical pattern recognition, John Wiley & Sons, 2004.
- [30] A. Rytter, Vibrational based inspection of civil engineering structures, (1993).
- [31] C.J. Hellier, Handbook of nondestructive evaluation, McGraw-Hill Education, 2013.
- active control, Smart materials and structures, 21(10) (2012) 105017.
- [19] Y. Lei, H. Zhou, L.J. Liu, An on-line integration technique for structural damage detection and active optimal vibration control, International Journal of Structural Stability and Dynamics, 14(05) (2014) 1440003.
- [20] Y.L. Xu, Q. Huang, Y. Xia, H. Liu, Integration of health monitoring and vibration control for smart building structures with time-varying structural parameters and unknown excitations, Smart structures and systems, 15(3) (2015) 807-830.
- [21] K.J. Åström, B. Wittenmark, Adaptive control, Courier Corporation, 2013.
- [22] K.K. Nair, A.S. Kiremidjian, K.H. Law, Time series-based damage detection and localization algorithm with application to the ASCE benchmark structure, Journal of Sound and Vibration, 291(1-2) (2006) 349-368.
- [23] H. Sohn, C.R. Farrar, Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals, Smart materials and structures, 10(3) (2001) 446.
- [24] R. Yao, S.N. Pakzad, Autoregressive statistical pattern recognition algorithms for damage detection in civil

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Shirzadi, M. Bitaraf, Damage detection of model reference adaptively-controlled structures using control force as a damage sensitive feature, Amirkabir J. Civil Eng., 55(2) (2023) 301-318.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20786.7526



