



Developing a Procedure for Simultaneous Vibration Control and Health Monitoring of Structures using Semi-Active Viscous Dampers

M. Bahmani¹, S. M. Zahrai^{2*}

¹ Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

² School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

ABSTRACT: Using control devices to enhance system identification and damage detection in a structure requiring both vibration control and structural health monitoring is an interesting yet practical topic. In recent decades several independent research studies have been conducted on the semi-active vibration control and health monitoring of the civil structures subjected to earthquakes, whereas both require similar software. Therefore, where there is a need for both vibration control and health monitoring systems in a building structure, integrating both systems using common equipment would be economical. Application of the viscous dampers for control of buildings, due to their proper seismic performance, lack of significant increase in the structural mass, and least interference with the present situation of the building is rapidly increasing. For this reason, the main goal of this research is to present a new integrated procedure for simultaneous health monitoring and semi-active control of the building structure using the viscous dampers with variable damping coefficients. Next, a scheme is presented for updating the building characteristic matrices and identifying the structural parameters. Finally, according to the updated system matrices, the efficiency of semi-active viscous dampers is investigated. For this purpose, a linear quadratic regulator optimal control algorithm is used for a building subjected to seismic excitations. The results show that the structural parameters are accurately identified; and, at the same time, the building structural vibration is significantly reduced.

Review History:

Received: Jul. 12, 2019

Revised: Sep. 28, 2019

Accepted: Dec. 10, 2019

Available Online: Dec. 25, 2019

Keywords:

Structural health monitoring

Semi-active control

Damage detection

System identification

Viscous dampers

1. Introduction

In recent years, numerous research studies have been reported on the vibration control and health monitoring systems for the structures exposed to environmental disturbances such as earthquakes and wind. Nevertheless, most of them have considered two aspects of such systems independently. Although the implementation of vibration control and health monitoring system for a particular structure requires sensors, a data acquisition system, and a signal transmission system, yet the scope of function of each element differs from others depending on the main purpose persuaded by each of the sub-systems. Should the structure demands for both vibration control and health monitoring systems, the independent approach is way less than enough, both economically and practically, for achieving a smart structure with sensors (nervous system), processors (brain system), and force application jacks (muscular systems). In this respect, we need to present a new methodology for simultaneous vibration control and health monitoring of semi-active viscous damper-retrofitted structures, describing the main idea behind the present research [1, 2].

Previous studies have mostly considered the structural health monitoring simultaneously with the structural control using displacement- or acceleration-dependent dampers, while the current study presents an integrated vibration control and health monitoring system using semi-active (velocity-dependent) viscous dampers [2-9]. As of present,

a remarkable research gap is evident when it comes to the combination of structural vibration control by viscous dampers with simultaneous structural health monitoring to make use of the data generated by the health monitoring system to optimize the structural control. Proposed herein, the idea of simultaneous vibration control and health monitoring of structures using semi-active viscous dampers for improving the control algorithm offers numerous advantages, as follows:

1. Application of the control force proportional to the identified damage by the structural health monitoring system,
2. Optimization of the control force applied to the structure,
3. The ability to identify the damage location across the structures equipped with vibration control equipment to make timely decisions for repairing the structure,
4. Optimal location of the control equipment by using the structural health monitoring system,
5. Developing a smart structure.

2. Integrated structural vibration control and health monitoring system

2.1. Vibration control system using a semi-active viscous damper

In an attempt to reduce the earthquake-induced vibrations, one can adopt semi-active and passive viscous dampers incorporated into the bracings of different stories to improve the vibration-induced energy dissipation capacity and hence

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



reduce the seismic demand of the structure. Should a semi-active control system be used, one must begin with determining the type, location, and the required number of semi-active dampers for the considered structure [9-11]. To provide the control system with the required feedback information, the sensors, the data acquisition, and signal transmission systems must be designed properly so that the feedback information can be processed based on the control algorithm. Finally, the optimal control signal is dispatched to modify the parameters in such a way to achieve an economically efficient and optimal control force which is supposed to result in maximum reduction of the structural response. In this study, the semi-active viscous damper is used for integrated vibration control and structural health monitoring.

2.2. Structural health monitoring system

To identify the dynamic properties and parameters of the structure and detect possible damages to the structure following severe events or long service life, the systems of sensors, data acquisition, and signal transmission must be designed in such a way to provide the required information for system characterization and damage detection. Most of the existing damage detection techniques are based on vibration (dynamic methods), requiring the system matrix or the structural parameters of the healthy construction (before the incidence of damage), which are sometimes not readily available. Investigating the presented vibration control and structural health monitoring system, one can observe that both subsystems require sensors as well as data acquisition and signal transmission systems. Accordingly, from a practical point of view, simultaneous application of similar sensors and data acquisition and signal transmission systems for the structural health monitoring system is desirable.

2.3. Integrated vibration control and structural health monitoring system

This research aims to present an integrated vibration control and structural health monitoring system to update the model, reduce the seismic response, and detect possible damages through a systematic approach for a construction structure. To this end, the first step is to update the structural mass and stiffness matrices to identify the structural parameters based on increasing the specific stiffness of the semi-active viscous damper and the connected bracing. This model updating step can address the drawbacks of the existing methodologies. In this respect, updating the matrices facilitates the characterization of the existing structural parameters for structural vibration control, thereby providing a baseline for detecting the proceeding damages. The second step is to present a control algorithm for the structures equipped with such a semi-active viscous damper under seismic excitation. The primary goal of performing a quadratic linear optimal control algorithm is to achieve an economically efficient yet reliable control design. The application of this methodology provides for using the sensors simultaneously for structural health monitoring as well as damage detection, leading us toward common-sensor, common-data acquisition, and common-data transmission systems. The final step is to apply the proposed methodology for updating the model in damaged structures in an attempt to characterize the structural parameters of the damaged structure based on a particular stiffness using semi-active viscous dampers.

3. Conclusions

In this study, an integrated methodology was presented for simultaneous vibration control and structural health monitoring using a semi-active viscous damper. To characterize the system, a model updating design based on increasing the semi-active viscous damper parameters was presented considering the physical properties and the connection type of different structural components. For the sake of vibration control, a feedback-based strategy was proposed for the semi-active viscous dampers to attenuate the seismic response of the structure using the same sensors as those contributed to the damage detection system. A damage detection design was proposed, where the proposed system identification method is applied for both the main and damaged structures. The feasibility study and advantages of the proposed integrated system for vibration control and structural health monitoring using a semi-active viscous damper will be investigated numerically in Phase II of this research.

References

- [1] Q. Huang, Y. 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.
- [2] Y. 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.
- [3] 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.
- [4] J. He, Q. Huang, Y.-L. Xu, Synthesis of vibration control and health monitoring of building structures under unknown excitation, *Smart materials and structures*, 23(10) (2014) 105025.
- [5] Y. 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.
- [6] V. Gattulli, F. Romeo, Integrated procedure for identification and control of MDOF structures, *Journal of engineering mechanics*, 126(7) (2000) 730-737.
- [7] M. Schulz, P. Pai, D. Inman, Health monitoring and active control of composite structures using piezoceramic patches, *Composites Part B: Engineering*, 30(7) (1999) 713-725.
- [8] C. Ng, Y. Xu, Semi-active control of a building complex with variable friction dampers, *Engineering Structures*, 29(6) (2007) 1209-1225.
- [9] M.D. Symans, M.C. Constantinou, Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review, *Engineering structures*, 21(6) (1999) 469-487.
- [10] M.D. Symans, M.C. Constantinou, Experimental testing and analytical modeling of semi-active fluid dampers for seismic protection, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 8(8) (1997) 644-657.

[11] M.D. Symans, M.C. Constantinou, Seismic testing of a building structure with a semi-active fluid

damper control system, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 26(7) (1997) 759-777.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Bahmani, S. M. Zahrai, Developing a Procedure for Simultaneous Vibration Control and Health Monitoring of Structures using Semi-Active Viscous Dampers ,Amirkabir J. Civil Eng., 53(3) (2021) 223-226.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16737.6324](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16737.6324)





ارائه روندی برای کنترل ارتعاش و پایش همزمان سلامت سازه ها با میراگر های ویسکوز نیمه فعال

محمد بهمنی^۱، سید مهدی زهرائی^{۲*}

۱- گروه مهندسی عمران، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران.
۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

خلاصه: در چند دهه اخیر تحقیقات متعددی به کنترل نیمه فعال ارتعاش و پایش سلامت سازه های عمرانی در معرض زلزله به صورت جداگانه پرداخته اند؛ در حالی که هر دو آنها شامل سخت افزار مشابه هستند. بنابراین وقتی که یک سازه نیازمند هر دو سیستم کنترل ارتعاش و پایش سلامت سازه باشد، یکپارچه کردن دو سیستم با استفاده از تجهیزات مشترک مقرون به صرفه خواهد بود. استفاده از میراگرهای ویسکوز در کنترل ساختمان ها به دلیل عملکرد مناسب لرزه ای، عدم افزایش محسوس جرم سازه و کمترین تداخل با وضعیت موجود ساختمان، به صورت چشمگیر رو به افزایش می باشد. به همین دلیل هدف اصلی این تحقیق ارائه یک روند جدید و یکپارچه برای پایش سلامت و کنترل نیمه فعال سازه با استفاده از میراگرهای ویسکوز با میرایی متغیر می باشد. در این تحقیق ابتدا مفهوم سیستم یکپارچه با استفاده از میراگر ویسکوز نیمه فعال بیان می شود و پس از آن طرحی برای بهنگام سازی ماتریس های مشخصه ساختمان و شناسایی پارامترهای سازه ای آن ارائه می گردد. در پایان، بر اساس بهنگام سازی ماتریس های سیستم، کارایی کنترل میراگرهای ویسکوز نیمه فعال با استفاده از الگوریتم کنترل بهینه خطی درجه دو برای ساختمانی که در معرض تحریک زلزله قرار گرفته است بررسی می شود. نتایج عددی نشان داد با استفاده از روش پیشنهادی پارامترهای سازه ای می تواند به طور دقیق شناسایی شوند و در عین حال، ارتعاش بطور قابل توجهی در ساختمان کاهش می یابد.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۱

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۷/۰۶

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۰/۰۴

کلمات کلیدی:

پایش سلامت سازه

کنترل نیمه فعال

تشخیص خرابی

شناسایی سیستم

میراگرهای ویسکوز

۱- مقدمه

در مورد کنترل ارتعاش و پایش سلامت^۱ سازه های ساختمانی که در معرض ناملایمات محیطی از قبیل زلزله و باد قرار دارند در سال های اخیر تحقیقات زیادی انجام گرفته است. با این وجود در اکثر تحقیقات به این دو جنبه به صورت جداگانه پرداخته شده است. اگرچه سیستم کنترل ارتعاش و سیستم پایش سلامت سازه برای اجرا نیازمند حسگر، سیستم اکتساب داده ها و سیستم انتقال سیگنال هستند؛ اما محدوده عملکرد آنها با توجه به هدف اصلی هر کدام جدا می باشند. اگر سازه نیازمند هر دو سیستم پایش

سلامت و کنترل ارتعاش باشد، این دیدگاه بطور مجزا برای سازه های هوشمند با حسگرها (سیستم عصبی^۲)، پردازنده ها (سیستم هوشی^۳) و جک های اعمال نیرو (سیستم عضلانی^۴) اقتصادی و اجرایی نمی باشد [۱]. به همین دلیل ارائه یک متدولوژی جدید برای کنترل ارتعاش و پایش سلامت سازه های بهسازی شده با میراگر ویسکوز^۵ نیمه فعال به صورت همزمان، ایده اصلی این تحقیق می باشد. یکپارچگی پایش سلامت و کنترل ارتعاش سازه ها اخیرا توسط تعداد محدودی از محققین بررسی شده است. شولز و همکاران،

- 2 Nervous system
- 3 Brain system
- 4 Muscular system
- 5 Viscous damper

1 Vibration control and health monitoring

* نویسنده عهده دار مکاتبات: mzahrai@ut.ac.ir



فنونی برای پایش سلامت و کنترل ارتعاش سازه های کامپوزیتی انعطاف پذیر ارائه دادند [۲]. گاتولی و رومئو یک روش یکپارچه را بر اساس الگوریتم کنترل تطبیقی برای کنترل ارتعاش و تشخیص خرابی^۱ سیستم های سازه ای خطی ارائه نمودند [۳]. چن و ژو یک روش یکپارچه کنترل ارتعاش و پایش سلامت سازه های ساختمانی را با به روز رسانی مدل و به کارگیری میراگر اصطکاکی پیشنهاد و به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند [۴]. ناگاراچایا یک الگوریتم پایش سلامت و کنترل ارتعاش سازه ها را با استفاده از ردیابی فرکانس لحظه ای و به کارگیری میراگرهای جرمی تنظیم شونده هوشمند، پیشنهاد داد [۵]. هانگ و همکاران روش جدیدی برای شناسایی سیستم و تشخیص آسیب سازه های ساختمانی کنترل شده مجهز به میراگرهای اصطکاکی نیمه فعال با استفاده از بروزرسانی مدل و بر اساس تابع پاسخ فرکانسی ارائه نمودند [۱]. هی و همکاران یک روش یکپارچه پایش سلامت و کنترل ارتعاش سازه ها را بر اساس فیلتر کالمن برای شناسایی پارامترهای فیزیکی سازه های کنترل شده بدون در نظر گرفتن تحریک خارجی پیشنهاد دادند [۶]. ژو و همکاران امکان استفاده از سختی افزوده شده توسط میراگرها و بکارگیری تابع پاسخ فرکانسی را برای تشخیص خرابی در یک مجتمع ساختمانی به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند [۷]. هی و همکاران امکان ایجاد ساختمانی هوشمند با عملکرد تشخیص خرابی همزمان با کنترل ارتعاش توسط میراگر سیال مغناطیسی را به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند [۸]. پدram و همکاران روشی را برای تشخیص خرابی در ورق ها و پوسته ها در حوزه فرکانس با استفاده از روش اجزای محدود ارائه دادند. آنها روش پیشنهادی خود را در چند مدل سازی عددی آزمودند و نشان دادند که روش پیشنهادی عملکرد خوبی در مورد اجزای صفحه ای و پوسته ای دارد [۹]. پارک و اوه روشی را برای تشخیص خرابی سازه های ساختمانی تحت اثر تحریک اجباری از طریق تحلیل رابطه بین نسبت مشارکت مودال و سختی طبقات پیشنهاد دادند. آنها روش پیشنهادی خود را در یک ساختمان بتن آرمه سه بعدی به کار بردند. نتایج تحلیل نشان داد که این روش به خوبی محل و شدت خرابی در سازه را تعیین می کند [۱۰].

عمده تحقیقات مرور شده پایش سلامت سازه را به صورت همزمان با کنترل سازه با میراگرهای وابسته به تغییر مکان یا وابسته

1 Damage detection

به شتاب انجام داده اند، در این تحقیق یک روند یکپارچه جهت کنترل ارتعاش و پایش سلامتی سازه با استفاده از میراگرهای ویسکوز نیمه فعال (وابسته به سرعت) ارائه می شود. امروزه خلاء تحقیقاتی قابل توجهی در ترکیب کنترل ارتعاش سازه ها به همراه میراگر ویسکوز و پایش همزمان سلامت سازه ها با هدف استفاده از نتایج به دست آمده از سیستم پایش سلامت سازه ای در کنترل سازه ها مشاهده می گردد. ایده پیشنهادی کنترل ارتعاش و پایش هم زمان سلامت سازه ها با میراگرهای ویسکوز نیمه فعال با هدف بهبود الگوریتم کنترل، مزیت های زیادی به شرح زیر دارد:

(۱) اعمال نیروی کنترلی متناسب با نوع آسیب شناسایی شده

توسط سیستم پایش سلامت سازه ای

(۲) بهینه کردن نیروی کنترلی اعمال شده به سازه ها

(۳) امکان اطلاع از محل وقوع خرابی در سازه های مجهز به

تجهیزات کنترلی و گرفتن تصمیم به موقع برای تعمیر سازه

(۴) مکان یابی بهینه برای قرارگیری تجهیزات کنترلی با استفاده از

سیستم پایش سلامت سازه

(۵) ایجاد سازه هوشمند

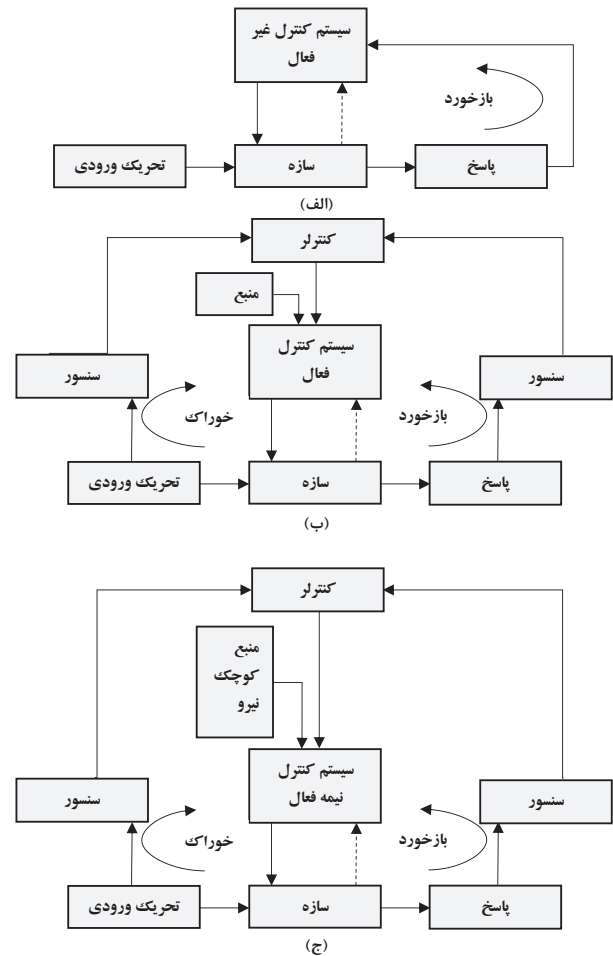
در این مطالعه پس از آن که مفهوم سیستم یکپارچه با میراگرهای ویسکوز نیمه فعال معرفی شد، یک طرح به هنگام سازی مدل با استفاده از میراگرهای ویسکوز نیمه فعال جهت به هنگام سازی ماتریس های سختی و جرم ساختمان و برای شناسایی پارامترهای سازه ای ارائه می شود. شایان ذکر است که این تحقیق در قالب دو فاز ارائه می گردد. برای فاز اول در مقاله حاضر روند پیشنهادی ارائه می شود و در فاز دوم تحقیق که ادامه دارد، کاربرد روش جدید ارائه شده در سازه ها به همراه مطالعات عددی مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- طبقه بندی روش های کنترل سازه ها

کنترل سازه ها تحت تاثیر تحریک لرزه ای، همواره یک کار پر چالش برای حرفه مهندسی عمران است. رویکرد سنتی برای کاهش خطر لرزه ای، طراحی سازه هایی با ظرفیت مقاومت جانبی کافی می باشد. در دو دهه اخیر مفاهیم جدیدی از کنترل سازه

۲) سیستم های کنترل فعال: یک سیستم کنترل فعال به طور معمول نیازمند یک منبع قدرت بزرگ برای کارکرد الکتروهیدرولیک یا الکترومکانیکی محرکها (که نیروهای کنترل را به سازه وارد می کنند) است. نیروهای کنترلی بر اساس بازخورد از سنسورهایی که تحریک ورودی و یا پاسخ سازه را اندازه گیری می کنند، توسعه می یابد.

۳) سیستم های کنترل نیمه فعال: سیستم کنترل نیمه فعال به طور معمول نیاز به یک منبع انرژی خارجی کوچک دارد (به عنوان مثال باتری با توان حداکثر ۶۰ وات) و از حرکت سازه برای توسعه نیروهای کنترلی استفاده می کند. مقدار نیروهای کنترلی بر توسط منبع برق خارجی تنظیم شود. همچنین نیروهای کنترلی بر اساس بازخورد از سنسورهایی برای اندازه گیری تحریک ورودی یا پاسخ سازه توسعه می یابند. این بازخورد از پاسخ سازه می تواند در مکان های دور از محل نصب سیستم کنترل نیمه فعال اندازه گیری شود. به عبارت بهتر می توان گفت یک سیستم کنترل نیمه فعال به طور کلی از یک سیستم کنترل غیرفعال الهام می گیرد و به نحوی اصلاح شده است تا امکان تنظیم خواص مکانیکی در آن فراهم شود. شایان ذکر است که سه نوع اصلی سیستم های کنترل سازه که در بالا توضیح داده شده اند، گاهی اوقات ترکیب می شوند تا سیستم های کنترل ترکیبی را تشکیل دهند. سیستم های کنترل ترکیبی شامل ترکیب دستگاه های غیرفعال و فعال یا ترکیب دستگاه های غیرفعال و نیمه فعال می باشند. در شکل ۱ تفاوت روش های مختلف کنترل سازه به صورت شماتیک نمایش شده است [۱۱].



شکل ۱. دیاگرام سیستم های کنترل سازه ای: الف) سیستم غیرفعال، ب) سیستم فعال و ج) سیستم نیمه فعال [۱۱].

Fig. 1. Block diagram of structural control systems: (a) passive control system, (b) active control system and (c) semi-active control system.

ها، از جمله سیستم های کنترل غیرفعال و فعال، در حال پذیرش و توسعه هستند. از ترکیب ایده سیستم های کنترل فعال و غیر فعال به تازگی سیستم های کنترل نیمه فعال توسعه داده شده است. سیستم های کنترل نیمه فعال قابلیت اطمینان سیستم های کنترلی غیرفعال را حفظ نموده و از ویژگی های پارامتر قابل تنظیم یک سیستم کنترل فعال نیز بهره می برند [۱۱]. سیستم های کنترل سازه ها را می توان به سه بخش کلی زیر تقسیم بندی نمود:

۱) سیستم های کنترل غیرفعال: یک سیستم کنترل غیرفعال نیازی به منبع قدرت خارجی برای کنترل سازه ندارد و از حرکت سازه برای ایجاد نیروهای کنترلی استفاده می کند. در این سیستم ها نیروهای کنترلی تابعی از پاسخ سازه در محل نصب میراگرهای کنترل غیرفعال هستند.

۳- معرفی میراگر ویسکوز نیمه فعال بکار گرفته شده در الگوریتم یکپارچه

۳-۱- مشخصات فیزیکی

شکل ۲ یک میراگر ویسکوز نیمه فعال را نشان می دهد که در عمل مشابه میراگر ویسکوز غیرفعال است و تنها تفاوت آن در این است که این میراگر براساس وضعیت شیر کنترل می تواند در دو سطح متمایز (حد بالای میرایی و حد پایین میرایی) و یا در یک دامنه گسترده بین حد بالا و پایین، میرایی سازه را بهبود بخشد. بخش غیرفعال میراگر سیال نیمه فعال شامل یک پیستون فولادی

غیر قابل تراکم بودن سیال می توان نشان داد نرخ جریان سیال در سوراخ های کوچک (روزنه یا اوریفیس) با افت فشار مرتبط است.

$$Q = kA \left(\frac{2\Delta P}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

که در این رابطه k ضریب تخلیه اوریفیس، A سطح اوریفیس و ρ میانگین چگالی سیال است. این رابطه برای سوراخ های قابل تنظیم موجود در شیر کنترل نیز قابل استفاده است، اما برای سوراخ های موجود در سر پیستون میراگر صادق نمی باشد. به همین دلیل رابطه تجربی زیر برای اوریفیس های اولیه موجود در سر پیستون استفاده می شود.

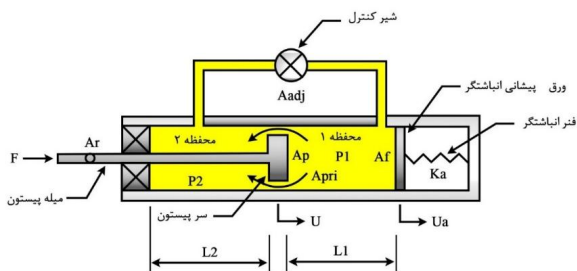
$$Q_{PRI} = k_{PRI} A_{PRI} \left(\frac{2\Delta P}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

توان واحد در رابطه بالا صرفاً جهت تأکید نمایش داده شده است. معادله پایستاری جرم برای محفظه i به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{dV_i}{dt} + \frac{V_i}{\beta_i} \frac{dP_i}{dt} = (-1)^i k_{PRI} A_{PRI} \left(\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

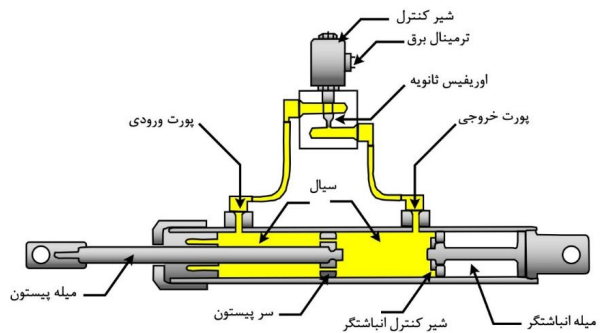
فرض بر این است که سیال درون محفظه در تماس مستقیم با صفحه پیشانی انباشتگر می باشد که به فنر الاستیک خطی متصل است. بنابراین معادله (۴) را می توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{A_p \dot{u} - k_{PRI} A_{PRI} \left(\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} - k_{ADJ} A_{ADJ} \left(\frac{2|P_1 - P_2|}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(P_1 - P_2)}{\left[\left(L_1 - u + \frac{P_1 A_f}{K_a} \right) \frac{A_p}{\beta_1} + \frac{A_f A_p}{K_a} \right]} \quad (5)$$



شکل ۳. مدل تحلیلی میراگر ویسکوز نیمه فعال [۱۴].

Fig. 3. Schematic of semi-active viscous damper used to generate analytical model



شکل ۲. طرح شماتیک میراگر ویسکوز نیمه فعال [۱۴].

Fig. 2. Schematic of semi-active viscous damper

ضد زنگ، یک سر پیستون برنز، یک انباشتگر و روغن سیلیکونی درون آن است. سوراخ سر پیستون به نحوی طراحی شده است که شدت جریان سیال با توجه به سرعت سیال که در نتیجه نیروی خارجی و متناسب با سرعت نسبی سر پیستون نسبت به محفظه میراگر است، تغییر می یابد. به عبارت بهتر میراگر غیرفعال برای ایجاد میراگر نیمه فعال با میرایی متغیر با استفاده از یک حلقه بیرونی خارجی حاوی شیر کنترل، اصلاح شده است [۱۲].

۲-۳- مدل مکانیکی برای میراگرهای ویسکوز نیمه فعال

در این قسمت برای تشریح رفتار دینامیکی میراگر ویسکوز نیمه فعال یک مدل مکانیکی کلی توسعه داده می شود. مدل شماتیک میراگر نیمه فعال که برای ساختن مدل تحلیلی به کار گرفته می شود، در شکل ۳ نمایش داده شده است.

بر اساس تغییرشکل های مرزی، تراکم پذیری سیال و با فرض چگالی میانگین برای سیال درون محفظه، معادله پیوستگی نرخ جریان جرمی درون انباشتگر میراگر به صورت زیر است [۱۲]:

$$\frac{dV_i}{dt} + \frac{V_i}{\beta_i} \frac{dP_i}{dt} = Q_{IN} - Q_{OUT} \quad (1)$$

که در آن V حجم سیال، β مدول بالک سیال، P فشار داخل سیال، Q_{IN} نرخ جریان ورودی و Q_{OUT} نرخ جریان خروجی به محفظه انباشتگر میراگر است.

با استفاده از پایستاری انرژی، پیوستگی نرخ جریان جرمی و فرض

۴-۲- سیستم پایش سلامتی سازه

برای شناسایی مشخصات دینامیکی و پارامترهای سازه و برای تشخیص خرابی احتمالی ساختمان پس از اتفاقات شدید یا سرویس‌دهی بلندمدت، سیستم حسگرها، سیستم اکتساب داده‌ها و سیستم انتقال داده‌ها باید به نحوی طراحی گردند که اطلاعات ضروری را برای شناسایی سیستم و تشخیص خرابی مهیا سازند. اکثر روش‌های تشخیص خرابی کنونی که بر مبنای ارتعاش هستند (روش‌های دینامیکی) نیازمند ماتریس سیستم یا پارامترهای سازه‌ای ساختمان سالم (قبل از خرابی) هستند که گاهی اوقات این پارامترها در دسترس نمی‌باشند. با مقایسه سیستم کنترل ارتعاش که در شکل ۴ الف نشان داده شده با سیستم پایش سلامتی سازه که در شکل ۴ ب نشان داده شده است، می‌توان مشاهده نمود که هر دو سیستم نیازمند حسگرها، سیستم اکتساب داده‌ها و سیستم انتقال داده‌ها هستند. بنابراین از دیدگاه عملی و اجرایی کاربرد سیستم حسگرها، سیستم انتقال داده و سیستم اکتساب داده‌ی مشابه، برای کنترل و پایش سلامتی سازه مطلوب می‌باشد [۱].

$$\frac{dP_2}{dt} = \begin{pmatrix} (A_r - A_p)\dot{u} + k_{PRI} A_{PRI} \\ \left(\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} + k_{ADI} A_{ADI} \\ \left(\frac{2|P_1 - P_2|}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(P_1 - P_2) \end{pmatrix} \left\{ \frac{\beta_2}{(A_r - A_p)(L_2 + u)} \right\} \quad (6)$$

که در آن A_p مساحت سر پیستون، A_r سطح میله متصل به پیستون، A_f سطح صفحه پیشانی انباشتگر، K_a سختی فنر متصل به صفحه پیشانی، L_1 و L_2 طول محفظه یک و دو وقتی که پیستون در مرکز انباشتگر قرار گرفته و u تغییرمکان نسبی سر پیستون نسبت به محفظه میراگر می‌باشد. در نهایت نیروی خروجی میراگر نیمه‌فعال که نتیجه اختلاف فشار دو سر پیستون است به صورت زیر می‌باشد:

$$F = P_1 A_p - P_2 (A_p - A_r) + F_f \text{sgn}(\dot{u}) \quad (7)$$

که در آن F_f میزان نیروی مورد نیاز برای غلبه بر اصطکاک میله پیستون و سیال درون محفظه می‌باشد.

۴- سیستم یکپارچه کنترل ارتعاش و پایش سلامت سازه

۴-۱- سیستم کنترل ارتعاش با استفاده از میراگرهای

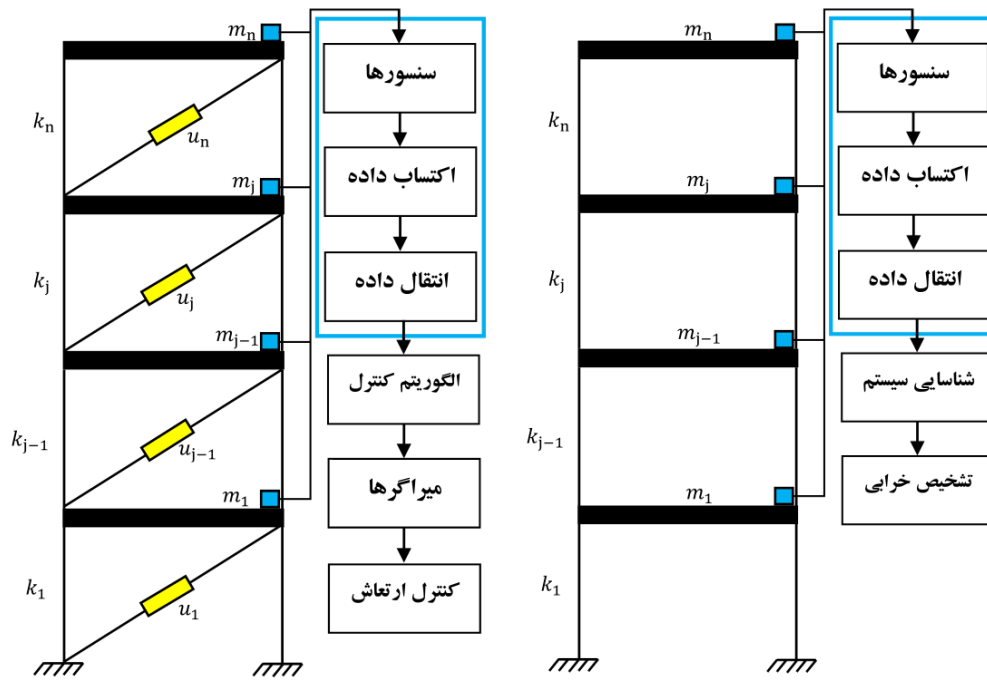
ویسکوز نیمه‌فعال

یک سازه برشی چند طبقه را که تحت تحریک زلزله قرار گرفته است مطابق شکل ۴ الف در نظر بگیرید. برای کاهش ارتعاش ناشی از زلزله، می‌توان از میراگرهای نیمه‌فعال و غیرفعال که در مهاربندی‌های هر طبقه قرار می‌گیرند، جهت افزایش ظرفیت اتلاف انرژی ارتعاش و کاهش نیاز لرزه‌ای بهره برد. اگر از سیستم کنترل نیمه‌فعال استفاده شود، ابتدا باید نوع، محل قرارگیری و تعداد میراگرهای نیمه‌فعال برای ساختمان مشخص شود. سیستم حسگرها، سیستم اکتساب داده‌ها و سیستم انتقال سیگنال برای مهیا کردن اطلاعات بازخور در سیستم کنترل باید به درستی طراحی شوند، به نحوی که اطلاعات بازخور بر مبنای الگوریتم کنترل، پردازش شود. در پایان سیگنال کنترل بهینه برای تغییر پارامترها و به جهت دستیابی به نیروی کنترل اقتصادی و بهینه که بیشترین کاهش پاسخ ساختمان را منجر شده است، ارسال می‌شود [۴]. در این مطالعه میراگر ویسکوز نیمه‌فعال جهت کنترل ارتعاش و پایش سلامتی سازه به صورت یکپارچه بکار گرفته می‌شود.

۴-۳- سیستم یکپارچه کنترل ارتعاش و پایش سلامتی سازه:

هدف این تحقیق ارائه یک سیستم یکپارچه کنترل ارتعاش و پایش سلامتی برای انجام به‌هنگام‌سازی مدل، کاهش پاسخ لرزه‌ای و تشخیص خرابی در یک روش سیستماتیک برای یک سازه ساختمانی است. گام اول به‌هنگام کردن ماتریس‌های جرم و سختی ساختمان برای شناسایی پارامترهای ساختمان بر مبنای افزودن سختی مشخص میراگر ویسکوز نیمه‌فعال و مهاربند متصل به آن می‌باشد. این طرح به‌هنگام‌سازی مدل می‌تواند نواقص موجود در روش‌های کنونی را برطرف کند. در این روش، به‌هنگام‌سازی ماتریس‌ها باعث تسهیل در شناخت پارامترهای سازه‌ای موجود در کنترل ارتعاش سازه و مهیا کردن یک حالت مبنا جهت تشخیص خرابی‌های بعدی می‌شود. گام دوم ارائه یک الگوریتم کنترل برای ساختمان به همراه میراگرهای ویسکوز نیمه‌فعال است که تحت تحریک زلزله قرار گرفته است.

هدف اولیه از اجرای الگوریتم کنترل بهینه خطی درجه دو، رسیدن به طرح کنترلی اقتصادی و قابل اطمینان می‌باشد. استفاده از این



شکل ۴. سیستم‌های کنترل ارتعاش و پایش سلامت سازه: (الف) سیستم کنترل ارتعاش سازه و (ب) سیستم پایش سلامت سازه

Fig. 4. Vibration control system using semi-active friction dampers: (a) configuration of control system; (b) damper mechanical model.

$$K_0 X_0 = M_0 X_0 \Lambda_0 \quad (8)$$

که در آن K_0 و M_0 ماتریس‌های جرم و سختی ساختمان اصلی و X_0 ماتریس مودال ساختمان اصلی و Λ_0 یک ماتریس قطری است که المان‌ها را به فرکانس‌های طبیعی ساختمان اصلی مرتبط می‌سازد. هدف از شناسایی سیستم بدست آوردن ماتریس‌های سختی و جرم سازه ساختمانی با استفاده از اندازه‌گیری شکل مد و فرکانس‌های طبیعی می‌باشد. فرض می‌کنیم که میراگرهای ویسکوز نیمه‌فعال نصب شده در ساختمان به نحوی طراحی شده‌اند که هنگامی که ساختمان تحت تحریک محیطی جهت اندازه‌گیری شکل مود و فرکانس طبیعی قرار می‌گیرد همه میراگرهای ویسکوز نیمه‌فعال در کشش هستند و ماتریس سختی اضافه شده میراگرها و مهاربندی که به آن متصل هستند مشخص است و با K_a نمایش داده می‌شود. مسأله مقادیر ویژه سازه ساختمانی به همراه سختی اضافه شده به صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$(K_0 + K_a)X = M_0 X \Lambda \quad (9)$$

که در آن X ماتریس مودال سازه ساختمانی با سختی اضافه

روش امکان استفاده از سنسورها را به عنوان حسگر به صورت مشترک برای پایش سلامتی سازه و تشخیص خرابی می‌دهد که این موضوع ما را به سمت استفاده از سیستم حسگر مشترک، سیستم اکتساب و انتقال داده‌های مشترک سوق می‌دهد. کار نهایی به کاربردن طرح پیشنهادی به‌هنگام‌سازی مدل در ساختمان آسیب دیده جهت شناسایی پارامترهای سازه‌ای ساختمان آسیب دیده بر مبنای افزودن یک سختی مشخص با استفاده از میراگرهای ویسکوز نیمه‌فعال می‌باشد.

با استفاده از مقایسه پارامترهای سازه‌ای ساختمان آسیب دیده با ساختمان سالم می‌توان محل و شدت آسیب سازه‌ای را مشخص نمود. شکل ۵ یک نمودار شماتیک را برای طرح پیشنهادی یکپارچه کنترل ارتعاش و پایش سلامتی سازه برای یک ساختمان برشی نمایش می‌دهد.

۵- شناسایی پارامترهای ساختمان اصلی (آسیب ندیده)

در این تحقیق از به‌هنگام‌سازی مدل جهت به‌هنگام‌سازی ماتریس‌های جرم و سختی ساختمان اصلی و جهت شناسایی ساختمان به همراه میراگرهای ویسکوز نیمه‌فعال استفاده می‌شود. مسأله مقادیر ویژه در ساختمان اصلی با N درجه آزادی و بدون میراگر به شکل زیر می‌باشد [۱۳].

خواهیم داشت:

با کم کردن (۱۳) از (۱۲) خواهیم داشت:

$$X_{0k}^T (K_0 + K_a) X_k \Lambda_k^{-1} = X_{0k}^T M_0 X_k \quad (13)$$

با ساده سازی معادله (۱۴) خواهیم داشت

$$\Lambda_{0k}^{-1} X_{0k}^T K_0 X_k - X_{0k}^T (K_0) X_k \Lambda_k^{-1} = S_k \quad (14)$$

$$S_k = X_{0k}^T (K_a) X_k \Lambda_k^{-1} \quad (15)$$

$$U_k = X_{0k}^T (K_0) X_k \quad (16)$$

$$\Lambda_{0k}^{-1} U_k - U_k \Lambda_k^{-1} = S_k \quad (17)$$

با توجه به اینکه Λ_{0k} و Λ_k ماتریس های قطری هستند، معادله

(۱۷) را می توان بسط داد، (i, j) امین المان این ماتریس به شکل

شده و Λ ماتریس قطری است که المان ها را با فرکانس طبیعی سازه ساختمانی با سختی اضافه شده مربوط می کند. در واقعیت گاهی اوقات اندازه گیری تمامی فرکانس طبیعی و شکل مودها برای یک سازه ساختمانی مشکل می باشد. با فرض آنکه تعداد فرکانس ها طبیعی و شکل مودهای اندازه گیری شده در دسترس Ne (از تمام درجات آزادی) باشد، معادلات (۸) و (۹) می توانند به شکل زیر اصلاح شوند.

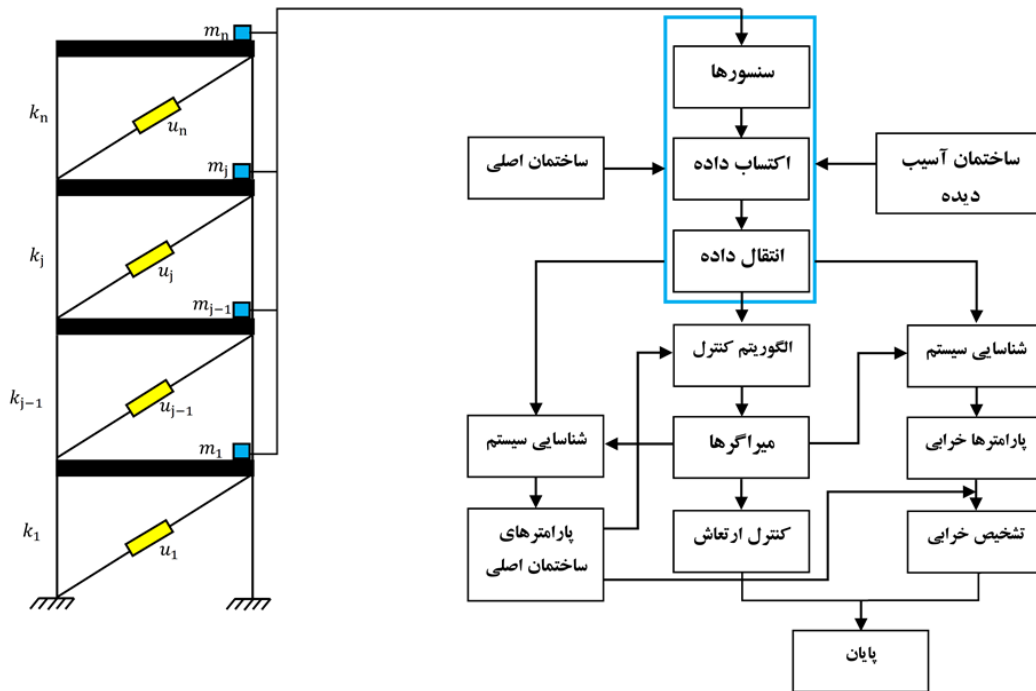
$$K_0 X_{0k} = M_0 X_{0k} \Lambda_{0k} \quad (10)$$

$$(K_0 + K_a) X_k = M_0 X_k \Lambda_k \quad (11)$$

که در آن X_k و X_{0k} ماتریس مودال $Ne \times Ne$ هستند که المان ها را با Ne فرکانس طبیعی اندازه گیری شده سازه ساختمانی بدون سختی اضافه شده و با سختی اضافه شده مرتبط می سازند. با پس ضرب معادله (۱۰) در X_k و پیش ضرب این معادله در Λ_{0k}^{-1} خواهیم داشت.

$$\Lambda_{0k}^{-1} X_{0k}^T K_0 X_k = X_{0k}^T M_0 X_k \quad (12)$$

با پیش ضرب معادله (۱۱) در X_{0k}^T و پس ضرب آن در Λ_k^{-1}



شکل ۵. سیستم یکپارچه کنترل ارتعاش و پایش سلامتی سازه

Fig. 5. Integrated vibration control and health monitoring system.

زیر می باشد.

$$\left(\frac{1}{\lambda_{0ki}} - \frac{1}{\lambda_{kij}}\right)U_{kij} = S_{kij} \quad (18)$$

$$(i, j = 1, 2, \dots, N_e)$$

بر اساس معادله (۱۵)، هر المان می تواند بر اساس ماتریس سختی اضافی مشخص، شکل مود ساختمان بدون سختی اضافه شده (که اندازه گیری شده است) و شکل مود و فرکانس طبیعی ساختمان با سختی افزوده شده مشخص گردد. بنابراین اگر فرکانس طبیعی اندازه گیری شده با سختی اضافی و بدون سختی اضافی با هم منطبق نشد، تمامی U_{kij} ناشناخته با استفاده از معادله (۱۸) مشخص می شوند و ماتریس U_k را می توان تعیین کرد. از این رو هر دو ماتریس X_k و X_{ok} در معادله (۱۶) ماتریس های مستطیلی هستند که معکوس پذیر نیستند. بنابراین برای پیدا کردن K_0 باید معادله (۱۶) به نحوی بازنویسی شود که K_0 در یک ستون نامشخص از بردار K_0 نمایان شود. مانند آنچه که در ادامه می آید.

$$A_k K_0 = h_k \quad (19)$$

$$A_k = X_{ok}^T \otimes X_k^T \quad (20)$$

$$K_0 = \begin{bmatrix} k_{11} \dots k_{1N} & | & k_{21} \dots k_{2N} \\ \dots & & \dots \\ k_{M1} \dots k_{MN} & & \dots \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

$$h_k = \begin{bmatrix} h_{11}^k \dots h_{1N_e}^k & | & h_{21}^k \dots h_{2N_e}^k \\ \dots & & \dots \\ h_{N_e 1}^k \dots h_{N_e N_e}^k & & \dots \end{bmatrix}^T \quad (22)$$

که در آن A_k ماتریس ضرایب با سایز $N_e^2 \times N^2$ ، ضرب \otimes ، کرونکر، طول بردار K_0 برابر N^2 و k_{ij} اعضای (i, j) ام از K_0 هستند، بردار h_k که طول آن N_e^2 و عضو h_{ij}^k آن معادل U_{kij} می باشد و علامت | جهت جدا کردن اعضا در ستون های مختلف استفاده می شود. از معادله (۱۹) می توان جهت شناسایی ماتریس

سختی اجزاء استفاده کرد. اگر تمامی شکل مودها و فرکانس های طبیعی را بتوان اندازه گیری کرد ($N_e = N$) معادله (۱۹) را می توان به صورت مستقیم و با استفاده از روش حذفی گوس حل نمود و اگر $N_e < N$ باشد، تبدیل به مسأله نامعین می شود که تعداد بیشماری راه حل دارد. مطالعات عددی انجام داده شده نشان می دهد که استفاده از کمترین مقدار نرم حداقل مربعات برای مسائل نامعین از دقت کافی برخوردار نمی باشد. علاوه بر این کمترین نرم حداقل مربعات برای حل معادله (۱۹) در نگاه داشتن خواص تقارن و پراکندگی ماتریس سختی تحلیلی ناموفق است، زیرا ماتریس سختی در اکثر سازه های مهندسی بسته به نحوه اتصال اعضا تعداد زیادی عضو صفر دارد. از نظر ریاضی می توان تمامی مؤلفه های صفر را در ماتریس K_0 و ستون های متناظر آنها در ماتریس A_k حذف نمود. برای ساختمان برشی که در این تحقیق مورد بررسی قرار می گیرد، ماتریس سختی سه قطری است $K_{ij} = 0 (abs(i - j) > 1)$ و معادله (۱۹) می تواند به شکل زیر ساده شود.

$$A_k^m K_0^m = h_k \quad (23)$$

$$K_0^m = [k_{11}, k_{12}, \dots, k_{ij}, \dots, k_{NN}]^T (abs(i - j) \leq 1) \quad (24)$$

A_k^m از A_k با حذف تمامی ستون هایی که در $K_{ij} = 0$ ضرب می شوند به دست می آید. در این روش سایز بردار K_0 از $1 \times (N^2)$ به سایز بردار $1 \times (3N - 2)$ کاهش می یابد. در اکثر موارد، معادله شناسایی (معادله (۲۳)) به دلیل محدودیت شکل مودهای اندازه گیری شده نامعین باقی می ماند و نتایج شناسایی سیستم نیز ممکن است سوال برانگیز باشد. به علاوه نتایج شناسایی سیستم از معادله (۲۳) به غیر از پارامترهای سازه ای مؤلفه های ماتریس سختی هستند. بنابراین نتایج شناسایی از معادله (۲۳) را نمی توان به صورت مستقیم در تشخیص خرابی به کار برد. به همین دلیل ماتریس انتقال جهت فائق آمدن بر نقیصه مزبور در این تحقیق معرفی می شود. برای یک ساختمان برشی N طبقه، تعداد ضرایب سختی افقی طبقه N می باشد، در حالی که تعداد مؤلفه های غیرصفر در ماتریس سختی $(2N - 3)$ می باشد. رابطه بین ضرایب سختی افقی طبقات $(i = 1, 2, \dots, N)$

با توجه به اینکه Λ_{0k} و Λ_k ماتریس های قطری هستند، معادله (۳۳) را می توان بسط داد؛ به طوری که در آن برای (i, j) امین مؤلفه به دست می آید:

$$(\lambda_{ki} - \lambda_{0kj})P_{kij} = Q_{kij} \quad (34)$$

با توجه به معادله (۳۱)، مؤلفه Q_{kij} را می توان به واسطه ماتریس سختی اضافه و شکل مود اندازه گیری شده بدون سختی اضافه شده تعیین نمود. بنابراین اگر فرکانس اندازه گیری شده سازه ساختمانی با و بدون سختی اضافه شده بر هم منطبق نشد، تمامی P_{kij} های نامشخص را می توان با استفاده از معادله (۱۹) پیدا کرد و ماتریس P_k را تعیین نمود. مشابه معادله (۱۹) معادله شناسایی برای ماتریس جرم را می توان به شرح زیر بیان نمود:

$$A_k m_0 = h_m \quad (35)$$

$$m_0 = \begin{bmatrix} m_{11} \dots m_{1N} \\ m_{21} \dots m_{2N} \dots m_{N1} \dots m_{NN} \end{bmatrix}^T \quad (36)$$

$$h_k = \begin{bmatrix} h_{11}^m \dots h_{1N_e}^m \\ h_{21}^m \dots h_{2N_e}^m \dots h_{N_e 1}^m \dots h_{N_e N_e}^m \end{bmatrix}^T \quad (37)$$

به علاوه با توجه به نحوه قرارگیری مؤلفه های ماتریس جرم، می توان سازه معادله شناسایی ماتریس جرم را کاهش داد. برای ساختمان برشی که در این مطالعه بررسی می شود، ماتریس جرم تحلیلی یک ماتریس قطری است و اگر $j \neq i$ آنگاه $m_{ij} = 0$. بنابر این معادله (۳۵) را می توان به شکل زیر ساده سازی کرد:

$$A_m^m m_0^m = h_m \quad (38)$$

که در آن:

$$m_0^m = [m_{11}, \dots, m_{ii}, \dots, m_{NN}]^T \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (39)$$

از حذف تمامی ستون هایی از A_k که در A_m^m

و مؤلفه های ماتریس سختی را می توان به شکل زیر نوشت:

$$K_0^m = TK_0^p \quad (25)$$

$$K_0^p = [k_1, k_2, \dots, k_N]^T \quad (26)$$

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{(3N-2)1} & a_{(3N-2)2} & \dots & a_{(3N-2)N} \end{bmatrix} \quad (27)$$

که در آن بردار K_0^m ضریب سختی افقی طبقه ساختمان اصلی است و ماتریس T ، ماتریس انتقال است که سازه آن $(3N-2) \times N$ می باشد. با جایگزینی معادله (۲۵) در معادله (۲۳)، معادله شناسایی به شکل زیر به دست می آید:

$$(A_k^m T) K_0^p = h_k \quad (28)$$

اگر $N_e^2 = N$ باشد معادله (۲۸) را می توان به صورت کامل جهت بدست آوردن بردار ضرایب سختی افقی طبقات حل نمود. اگر $N_e^2 > N$ یا $N_e^2 < N$ باشد به ترتیب به مسائل ناپایدار و نامعین تبدیل می شود. روش حل کمترین مقدار حداقل مربعات حل را به صورت زیر ارائه می دهد.

$$K_0^p = (A_k^m T)^+ h_k \quad (29)$$

که در آن $()^+$ ماتریس شبه معکوس می باشد. توسط معادله (۲۹) شناسایی می شود و بردار K_0^p با استفاده از معادله (۲۵) در پایان تعیین می گردد و با استفاده از این دو می توان ماتریس K_0 را تشکیل داد. ماتریس جرم ساختمان اصلی را نیز می توان با روند مشابه شناسایی نمود. از معادله (۱۰) و (۱۱) معادلات زیر را می توان استخراج نمود.

$$X_{0k}^T M_0 X_k \Lambda_k - \Lambda_{0k} X_{0k}^T M_0 X_k = Q_k \quad (30)$$

$$Q_k = X_{0k}^T K_a X_k \quad (31) \Rightarrow P_k \Lambda_k - \Lambda_{0k} P_k = Q_k \quad (33)$$

$$P_k = X_{0k}^T M_0 X_k \quad (32)$$

که در آن t_f آخرین زمان از فاصله ی زمانی کنترل، Z بردار حالت، P_d بردار نیروی کنترل، $[Q]$ یک ماتریس قطعی مثبت جهت وزن گذاری بردار حالت و $[R]$ یک ماتریس قطعی مثبت جهت وزن گذاری بردار نیروی کنترل است. مقادیر نسبی اختصاص داده شده به ماتریس های وزن گذاری بردارهای حالت و نیروی کنترل، نشان دهنده اهمیت به حداقل رساندن متغیرهای حالت و نیروهای کنترل است. مسأله کنترل بهینه شامل کمینه کردن تابع اسکالر J با لحاظ کردن معادله قیدهای استخراج شده از معادله حرکت سیستم می شود. روند کمینه سازی منجر به بردار نیروی کنترل زیر می شود:

$$\{P_d\} = -\frac{1}{2}[R]^{-1}[B]^T [P]\{Z\} = [G]\{Z\} \quad (41)$$

که در آن $[G]$ ماتریس کنترل ثابت، $[B]$ ماتریس موقعیت نیروی کنترل، و $[P]$ ماتریس ریکاتی است که از حل جبری معادله ریکاتی بدست می آید. لازم به ذکر است برای بدست آوردن بردار نیروی کنترل که در معادله (۴۱) توصیف شده است، ورودی زلزله باید نادیده گرفته شود. علاوه بر این در مطالعات تجربی و تحلیلی، مقادیر اختصاص یافته به ماتریس وزن، به طور معمول از طریق مطالعات پارامتری که شامل تحریک لرزه ای می شوند، به دست می آید. به عنوان مثال برای یک سازه سه طبقه برشی که میراگرهای ویسکوز نیمه فعال در طبقه اول آن نصب شده است بردار نیروی کنترل به صورت زیر است.

$$d = \sum_{n=1}^3 (g_{1,n} u_n) + \sum_{n=1}^3 (g_{1,n+3} \dot{u}_n) \quad (42)$$

که در آن $g_{i,j}$ مؤلفه ردیف i ام و ستون j ام ماتریس $[G]$ است و u_n و \dot{u}_n نسبت جابجایی نسبی و سرعت نسبی طبقه n ام می باشند. نیروی میرایی میراگرهای نیمه فعال عمدتاً مشابه میراگرهای ویسکوز خطی ولی با ضریب میرایی قابل تنظیم می باشد که به صورت زیر نمایش داده می شود.

$$P(t) = C_{SA} \dot{u}(t); \quad (43)$$

$$C_{\min} \leq C_{SA} \leq C_{\max}$$

که در آن $P(t)$ نیروی دمپر، $\dot{u}(t)$ سرعت نسبی سر پیستون دمپر، C_{SA} ضریب میرایی قابل تنظیم و C_{\min} و C_{\max} به ترتیب

ضرب می شوند بدست می آید. در نتیجه بردار $m_0 = 0$ با سائز $1 \times (N^2)$ به بردار m_0^m با سائز $1 \times (N)$ کاهش می یابد.

حل کمترین مقدار حداقل مربعات برای معادله (۳۸) ماتریس جرم m_0 را برای ساختمان اصلی می دهد. برای ماتریس میرایی سازه ساختمانی اصلی، رویکرد عملی جهت شناسایی نسبت میرایی مودال، استفاده از اندازه گیری پاسخ سازه ای و ساختن ماتریس میرایی C_0 بر مبنای تخمین میرایی می باشد.

۶- کنترل ارتعاش ساختمان اصلی

توسعه و کاربرد میراگرهای ویسکوز نیمه فعال جهت کاهش ارتعاش توجه محققین زیادی را در سال های اخیر به خود جذب کرده است. سیمانز و کنستانتینو طرحی را توسعه داده اند که در آن میراگرهای ویسکوز نیمه فعال با استفاده از اندازه گیری تحریک لرزه ای یا ارتعاش سازه، قادر به کنترل سازه با سطوح مختلف میرایی می باشد [۱۴]. در حالت کلی غالباً دو استراتژی کنترل توسط میراگر ویسکوز نیمه فعال توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است.

۱) استراتژی کنترل با بازخورد کلی که به عنوان یک استراتژی مدار بسته برای اجازه دادن میراگرهای ویسکوز نیمه فعال جهت عملکرد موثر به عنوان کنترل بهینه خطی درجه دو را می دهد.

۲) استراتژی کنترل با بازخور محلی که با استفاده از حرکت محلی و سیگنال های بازخور جهت تغییر نیروی مفصلی میراگرها و رسیدن به نیروی اتلاف حداکثر استفاده می شود.

با توجه به اینکه الگوریتم کنترل بهینه خطی درجه دو توسط محققان متعددی برای کاربرد در سازه های کنترل شده به روش نیمه فعال و فعال مورد بررسی قرار گرفته است، در این تحقیق از این الگوریتم برای کنترل ارتعاش سازه استفاده می شود. به طور کلی مسأله کنترل بهینه را می توان به این صورت بیان نمود: برای سیستمی که در معرض ورودی های خارجی است، کنترلی را پیدا کنید که یک معیار مشخص از عملکرد سیستم را به حداقل برساند. شاخص عملکرد برای مسأله LQR با مقدار اسکالر زیر به دست می آید [۱۴]:

$$J = \int_0^{t_f} \left(\{Z\}^T [Q] \{Z\} + \{P_d\} \right) dt \quad (40)$$

$$\left[[R]^T \{P_d\} \right]$$

$$P_1 + \lambda \dot{P}_1 = C_{SA} \cos^2 \theta \dot{u}_1 \quad (48)$$

که در آن λ ثابت آرامش (ریلکسیشن) است. معادلات (۴۶) تا (۴۸) را می‌توان به صورت مجموعه ای از معادلات دیفرانسیل مرتبه اول و به صورت زیر نوشت:

$$\{\dot{Z}\} = [A]\{Z\} + [H]\{f\} \quad (49)$$

که در این رابطه پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\{Z\} = \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{u\} \\ \{P_d\} \end{Bmatrix} \quad (50)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -[M]^{-1}[C_u] & -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1} \\ [I] & [0] & [0] \\ \lambda^{-1}[C] & [0] & \lambda^{-1}[I] \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$[H] = \begin{Bmatrix} [I] \\ [0] \\ [0] \end{Bmatrix} \quad (52)$$

$$\{f\} = \{1\} \ddot{u}_g \quad (53)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2C_{SA} \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (54)$$

در این معادله، $[I]$ و $[0]$ به ترتیب ماتریس واحد یا همانی و ماتریس صفر را نشان می‌دهند. از معادله (۴۱) برای تعیین نیروی کنترل استفاده شده است و معادله (۴۶) یا (۴۹) در پایان جهت تعیین پاسخ های سازه ای در مرحله بعدی استفاده می‌شود.

۷- تشخیص خرابی

خرابی در سازه را می‌توان به صورت تغییراتی در سازه که بر کارایی حال و آینده آن اثر منفی دارد تعریف نمود. هدف تشخیص خرابی سازه‌ای پیدا کردن این تغییرات با استفاده از اندازه‌گیری داده‌ها می‌باشد. روش تشخیص خرابی بر اساس ارتعاش (روش دینامیکی) توجه بسیاری از محققان را برای ارزیابی سلامت و ایمنی سازه‌های مهندسی عمران به خود جذب کرده است. بسیاری از روش‌های تشخیص خرابی

مرز پایین و مرز بالا میرایی قابل تنظیم هستند. با فرض این که میراگرهای نیمه‌فعال براساس مدل خطی میراگر ویسکوز رفتار می‌کنند و به صورت مورب در سازه نصب می‌شوند، تغییرات لازم در ضریب میرایی هر میراگر نیمه‌فعال به صورت زیر می‌باشد:

$$C_{SA} = \begin{cases} C_{\min} & \text{if } C^* \leq C_{\min} \\ (\eta \cos^2 \theta \dot{u}_1)^{-1} \left[d = \sum_{n=1}^3 (g_{1,n} u_n) + \sum_{n=1}^3 (g_{1,n+3} \dot{u}_n) \right], & \text{if } C_{\min} \leq C^* \leq C_{\max} \\ C_{\max} & \text{if } C^* \geq C_{\max} \end{cases} \quad (44)$$

که C^* عبارت است از:

$$C^* = \frac{1}{(\eta \cos^2 \theta \dot{u}_1)} \left[d = \sum_{n=1}^3 (g_{1,n} u_n) + \sum_{n=1}^3 (g_{1,n+3} \dot{u}_n) \right] \quad (45)$$

و η تعداد میراگرها و θ زاویه شیب میراگرهای نصب شده است. در ادامه به عنوان مثال برای یک ساختمان سه طبقه معادله حرکت سازه با میراگر نیمه‌فعال به شرح زیر ارائه می‌شود، در این معادله فرض بر این است که سازه به صورت ساختمان برشی رفتار می‌کند.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C_u]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} + \{P_d\} = -[M]\{1\}\ddot{u}_g \quad (46)$$

در این معادله $[M]$ ماتریس جرم، $[C_u]$ ماتریس میرای قاب بدون میراگر، $[K]$ ماتریس سختی، $\{P_d\}$ بردار نیروی کنترل، $\{1\}$ بردار واحد، u_g شتاب زمین، و $\{u\}$ ، $\{\dot{u}\}$ و $\{u\}$ به ترتیب بردارهای شتاب نسبی، سرعت و جابه جایی هستند. به عنوان مثال برای حالتی که دو میراگر ویسکوز نیمه‌فعال در طبقه اول یک سازه سه طبقه نصب شده باشد، بردار نیروی دمپر به صورت زیر است:

$$\{P_d\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2P_1 \end{Bmatrix} \quad (47)$$

که P_1 مؤلفه افقی نیروی میراگر در طبقه اول است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، میراگرهای نیمه‌فعال عمدتاً مشابه میراگرهای ویسکوز خطی اما با یک ضریب میرایی قابل تنظیم رفتار می‌کنند. با این حال، وقتی که فرکانس حرکت افزایش می‌یابد، میراگرها شروع به سفتی می‌کنند. این موضوع را می‌توان با استفاده از یک مدل ماکسول برای توصیف رفتار میراگر نشان داد:

$$K^d = [k_{11}^d, k_{12}^d, \dots, k_{ij}^d, \dots, k_{NN}^d]^T \quad (abs(i-j) \leq 1) \quad (58)$$

$$h_k^d = [h_{11}^d \dots h_{1N_e}^d | h_{21}^d \dots h_{2N_e}^d | \dots | h_{N_e 1}^d \dots h_{N_e N_e}^d]^T \quad (59)$$

که در آن A_k^d از $X_{0k}^{dT} \otimes X_k^{dT}$ با حذف تمامی ستون های ضرب شده در $K_{ij}^d = 0 (abs(i-j) \leq 1)$ بدست می آید. بردار ستونی نامشخص K^d طولش برابر (N^3-2) و بردار h_k^d طولش برابر N_e^2 و مؤلفه h_{ij}^d معادل U_{kij}^d در ماتریس U_k^d می باشد. ماتریس U_k^d با حل معادله (۵۷) تعیین می گردد. برای ساختمان برش که در این تحقیق بررسی می شود رابطه بین ضرایب سختی افقی طبقه و مؤلفه های ماتریسی سختی باید جهت بدست آوردن ماتریس انتقال T نوشته می شود. سختی افقی طبقه برای ساختمان آسیب دیده K^P می تواند با پیدا کردن کمترین نرم حداقل مربعات بدست آید.

$$K^P = (A_k^d T)^+ h_k^d \quad (60)$$

پس از مشخص شدن ضرایب سختی افقی طبقات ساختمان آسیب دیده می توان کل خرابی و شدت آن را در ساختمان آسیب دیده با معادله زیر تعیین نمود.

$$\Delta K^P = K^P - K_0^P \quad (61)$$

که در آن K_0^P بردار ضرایب سختی افقی طبقات در ساختمان اصلی می باشد که از شناسایی سیستم در بخش ۵ بدست می آید. نمودار پروسه تشخیص خرابی پیشنهادی برای ساختمان با میراگرهای ویسکوز نیمه فعال در شکل ۶ نمایش داده شده است.

۸- نتیجه گیری

در این مطالعه روشی یکپارچه برای کنترل ارتعاش و پایش سلامت سازه با استفاده از میراگر ویسکوز نیمه فعال پیشنهاد شده است. برای شناسایی سیستم، یک طرح به هنگام سازی مدل بر اساس اضافه کردن مشخصه های میراگر ویسکوز نیمه فعال و با توجه به مشخصات فیزیکی و نحوه اتصال اجزای سازه ارائه شده است. برای کنترل ارتعاش، یک استراتژی با بازخورد کلی برای میراگرهای ویسکوز نیمه فعال پیشنهاد شده است تا پاسخ های لرزه ای ساختمان را با استفاده از همان سنسورهایی که در شناسایی سیستم استفاده می شود، کاهش دهد. برای تشخیص خرابی، یک طرح تشخیص

دینامیکی بر اساس این ایده است که پارامترهای مودال اندازه گیری شده تابعی از خواص فیزیکی سازه هستند. بنابراین ناگزیر تغییر در پارامترهای فیزیکی باعث تغییر قابل تشخیص در پارامترهای مودال می شود. مباحث دقیق تر راجع به تشخیص خرابی دینامیکی را می توان در مرور مقالات توسط دوبلینگ و همکاران مطالعه کرد [۱۵].

پس از نصب ابزار کنترل نیز ممکن است سازه ی ساختمانی در حوادث شدید یا بر اثر سرویس دهی بلند مدت، متحمل برخی خرابی ها گردد، بنابراین ارائه یک دیدگاه منطقی جهت تشخیص خرابی در سازه های کنترل شده ضروری به نظر می رسد. در این مطالعه طرح به هنگام سازی مدل پیشنهادی در ساختمان های کنترل شده جهت شناسایی پارامترهای سازه ای و خرابی سازه ای بر مبنای افزودن مشخصه های میراگر ویسکوز نیمه فعال به کار گرفته می شود.

با مقایسه پارامترهای سازه ای ساختمان آسیب دیده با ساختمان آسیب ندیده، محل و شدت آسیب سازه ای را می توان مشخص کرد. مسأله مقدار ویژه برای ساختمان آسیب دیده بدون سختی اضافه شده به شکل زیر است [۴].

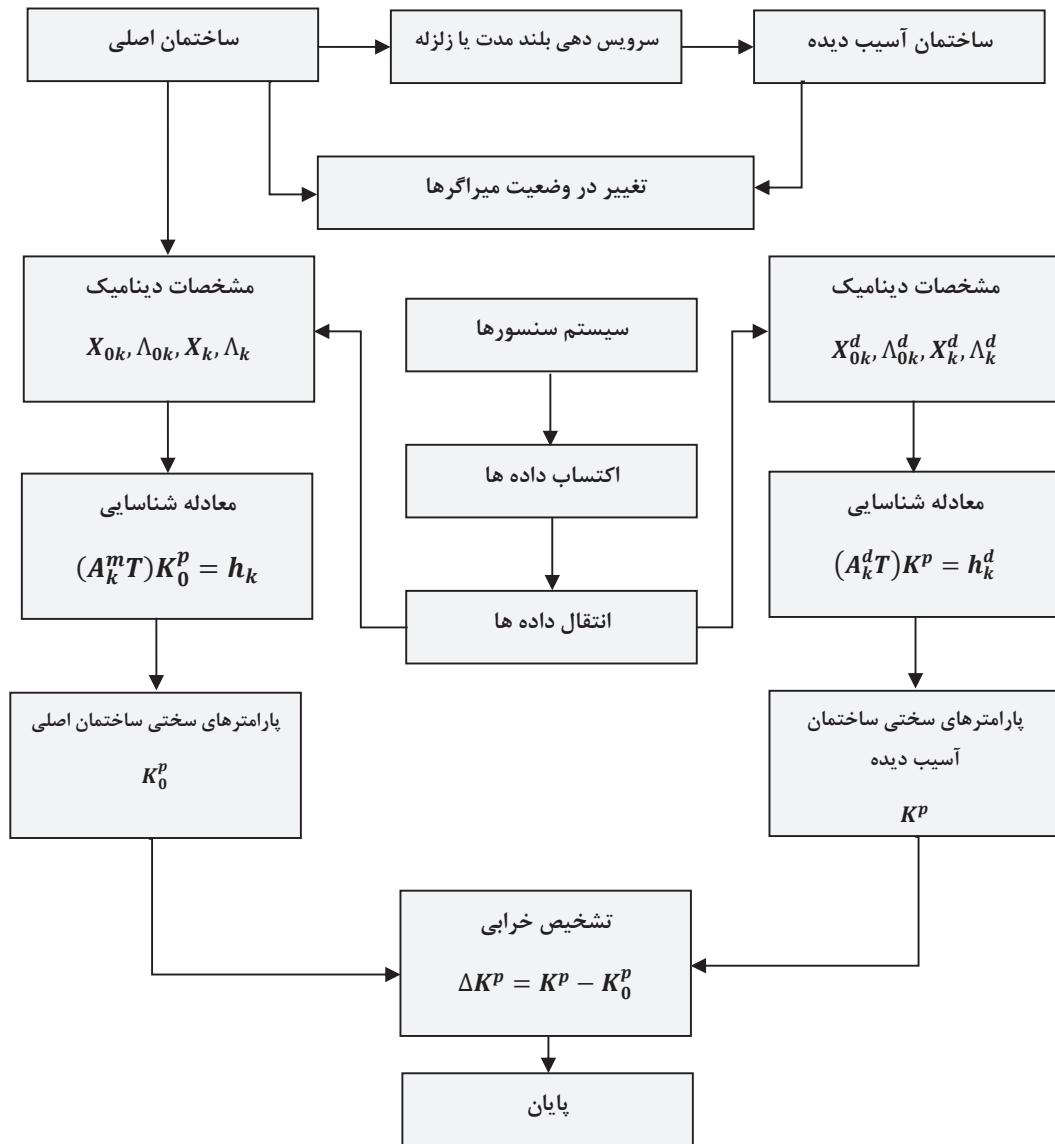
$$KX_{0k}^d = MX_{0k}^d \Lambda_{0k}^d \quad (55)$$

که در آن K و M ماتریس های سختی و جرم سازه آسیب دیده هستند. X_{0k}^d ماتریس مودال $N \times N_e$ اندازه گیری شده سازه می باشد و Λ_{0k}^d یک ماتریس قطری $N_e \times N_e$ است که مؤلفه های آن با مربع فرکانس طبیعی اندازه گیری شده سازه آسیب دیده مربوط است. مسأله مقدار ویژه برای ساختمان آسیب دیده با سختی اضافه شده به شکل زیر است:

$$(K + K_a) X_k^d = M X_k^d \Lambda_k^d \quad (56)$$

که در آن X_k^d ماتریس مودال $N \times N_e$ برای ساختمان با سختی افزوده می باشد و Λ_k^d یک ماتریس قطری $N_e \times N_e$ است که مؤلفه های آن با مربع فرکانس های طبیعی اندازه گیری شده رابطه دارد. در ادامه روندی مشابه جهت شناسایی سیستم و شناسایی معادله تشخیص سختی برای سازه آسیب دیده بدست می آوریم:

$$A_k^d K^d = h_k^d \quad (57)$$



شکل ۶. روند تشخیص خرابی برای ساختمان با میراگرهای ویسکوز نیمه فعال

Fig. 6. Flow chart of damage detection process.

۹- مراجع

- [1] Huang Q, Xu Y, Li J, Su Z, Liu H, Structural damage detection of controlled building structures using frequency response functions, Journal of Sound and Vibration, 331 (15) (2012) 3476-3492.
- [2] Schulz M, Pai P, Inman D, Health monitoring and active control of composite structures using piezoceramic patches, Composites Part B: Engineering, 30 (7) (1999) 713-725

آسیب ارائه شده است که روش شناسایی سیستم پیشنهادی را برای ساختمان اصلی و ساختمان آسیب دیده اعمال می کند. امکان سنجی و مزایای روش یکپارچه پیشنهادی برای کنترل ارتعاش و پایش سلامت سازه با استفاده از میراگر ویسکوز نیمه فعال در فاز دوم این تحقیق با استفاده از یک مطالعه عددی دقیق مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

- Science and Engineering, 26(1) (2018) 100-132.
- [10] Park H-S, Oh B-K, Damage detection of building structures under ambient excitation through the analysis of the relationship between the modal participation ratio and story stiffness, *Journal of Sound and Vibration*, 418 (2018) 122-143.
- [11] Symans MD, Constantinou MC, Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review, *Engineering structures*, 21 (6) (1999) 469-487
- [12] Symans MD, Constantinou MC, Experimental testing and analytical modeling of semi-active fluid dampers for seismic protection, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 8 (8) (1997) 644-657
- [13] Ng C, Xu Y, Semi-active control of a building complex with variable friction dampers, *Engineering Structures*, 29 (6) (2007) 1209-1225
- [14] Symans MD, Constantinou MC, Seismic testing of a building structure with a semi-active fluid damper control system, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26 (7) (1997) 759-777
- [15] Doebling SW, Farrar CR, Prime M, Shevitz D, A review of damage identification methods that examine changes in dynamic properties, *Shock and Vibration Digest*, 30 (2) (1998) 91-105
- [3] Gattulli V, Romeo F, Integrated procedure for identification and control of MDOF structures, *Journal of engineering mechanics*, 126 (7) (2000)730-737
- [4] Xu Y, Chen B, Integrated vibration control and health monitoring of building structures using semi-active friction dampers: Part I—methodology, *Engineering Structures*, 30 (7) (2008) 1789-1801
- [5] Nagarajaiah S, 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*, 16 (7-8) (2009) 800-841
- [6] He J, Huang Q, Xu Y-L, Synthesis of vibration control and health monitoring of building structures under unknown excitation, *Smart materials and structures*, 23 (10) (2014) 105025
- [7] Xu Y, Huang Q, Zhan S, Su Z, Liu H, FRF-based structural damage detection of controlled buildings with podium structures: Experimental investigation, *Journal of Sound and Vibration*, 333 (13) (2014) 2762-2775
- [8] He J, Xu Y-L, Zhan S, Huang Q, Structural control and health monitoring of building structures with unknown ground excitations: Experimental investigation, *Journal of Sound and Vibration*, 390 (2017) 23-38
- [9] Pedram M, Esfandiari A, Khedmati MR, Frequency domain damage detection of plate and shell structures by finite element model updating, *Inverse Problems in*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Bahmani, S. M. Zahrai, *Developing a Procedure for Simultaneous Vibration Control and Health Monitoring of Structures using Semi-Active Viscous Dampers*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(3) (2021) 995-1008.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16737.6324](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16737.6324)

