

کنترل ارتعاشات سازه‌های قابی در برابر بارهای انفجاری با استفاده از الگوریتم پیشنهادی کنترل فعال

بابک کریم پور^۱، جواد علامتیان^۲، علی کیهانی^{۳*}

۱- دانشجوی دکترا ۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی مشهد ۳- استادیار دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت: ۹۲/۰۵/۲۹، پذیرش: ۹۲/۱۲/۲۰)

چکیده

بارهای ناشی از انفجار می‌توانند سبب ایجاد آسیب‌های شدید در ساختمان‌ها شوند. با توجه به اینکه طراحی سازه‌ها در برابر انفجارهای بزرگ غیر اقتصادی و غیرعملی است، طراحان با روش‌هایی می‌کوشند خسارت‌های ناشی از انفجارها را کاهش دهند. در مقایسه با سایر تهدیدها همچون زلزله و باد، انفجار دارای تفاوت‌هایی مانند بزرگی شدت فشار وارده بر ساختمان، آسیب وجوه مختلف ساختمان با توجه به موقعیت منبع انفجار و زمان بسیار کوتاه رویداد می‌باشد. در مقاله حاضر روشی نوین برای پایش فعال نوسان‌های سازه‌ها در اثر بارهای انفجاری ارائه می‌شود. رابطه‌سازی این فرایند بر پایه اصول دینامیک سازه‌ها بوده و در آن، نوسان‌های سازه با چندین عملگر و حسگر پایش می‌شود. در اینجا نیز، نیروی هر عملگر به صورت نیروی معادل میرایی لزج پنداشته می‌شود. با این روش، نیروهای عملگر در یک فرایند ریاضی ساده به دست می‌آیند. کارایی روش پیشنهادی با بررسی تغییرات تغییر مکان، بیشینه انرژی جنبشی سازه و مجموع مقادیر تغییر مکان‌های نسبی طبقات در حالت‌های مختلف پایش فعال سازه پنج درجه آزادی تحت بار انفجاری بررسی می‌شود. نتایج عددی نشان می‌دهند که شیوه پایش فعال پیشنهادی عملکرد مناسبی در کاهش نوسان‌های سازه در اثر بارهای انفجاری دارد.

کلید واژه‌ها: بار انفجاری، سازه هوشمند، پایش فعال، حسگر، عملگر، تغییر مکان، انرژی جنبشی.

Vibration Control of Frame Structures Subjected to the Blast Loading by Active Control Proposed Algorithm

B. Karimpoor, J. Alamatian, A. Kayhani*

Shahrood University of Technology

(Received: 19/08/2013; Accepted: 11/03/2014)

Abstract

The blast loadings lead to serious damages in structures so that designers try to reduce these effects by special methods. In comparison with other threats such as earthquake and wind, the blast load has some unique characteristics i.e. the applied pressure to the structure, the situation of the blast source and small duration of blast loading. In this paper, a new approach is proposed for controlling the structural vibrations arising from the blast loads. The proposed active control method is based on structural dynamics theories in which multi actuators and sensors are utilized. Each actuator force is modeled as an equivalent viscous damper so that several lower vibration modes are damped critically. This subject is achieved by simple mathematical formulation. The proposed method does not depend on the type of dynamic load and it could be applied to control structures with multiple degrees of freedom. For numerical verification of proposed method, several criterions such as maximum displacement, maximum kinetic energy and maximum drift are evaluated in a five story shear building, subjected to the blast load. The results show that the proposed method has suitable efficiency for reducing structural vibrations caused from blast loading.

Keywords: Blast Load, Smart Structure, Active Control, Sensor, Actuator, Displacement, Kinetic Energy.

* Corresponding Author E-mail: a_keyhani@hotmail.com

۱. مقدمه

برای ابزار پایش نیمه فعال تولید می‌کند. همچنین در سامانه‌های نیمه‌فعال، همانند سامانه‌های غیرفعال، نیروهای پایش به عنوان نتیجه‌ای از حرکت سازه می‌باشند و بر اساس تنظیم مناسب ویژگی‌های مکانیکی سامانه پایش نیمه‌فعال به دست می‌آیند [۷].

جدول ۱. الگوریتم‌های متداول پایش فعال سازه‌ها

| نام روش | مبانی روش |
|----------------------------------|---|
| پایش بهینه خطی | کمینه کردن شاخص عملکرد |
| انتساب قطب | کمینه کردن شاخص عملکرد |
| فضای مودال مستقل | کمینه کردن نیروی پایش مودال |
| پایش بهینه آنی | تعیین نیروی پایش با کمینه کردن تابع عملکرد در هر لحظه از زمان |
| پایش حالت کران‌دار | حفظ پاسخ در محدوده مجاز |
| پایش غیر خطی | کمینه کردن تابع عملکرد مرتبه بالا |
| پایش بازخورد کلی شده | نیروی پایش تابعی خواهد شد از تغییر مکان سازه‌ای، سرعت و شتاب |
| پایش مود لغزشی (SMC) | تولید سطح لغزش شامل ترکیب خطی از عامل‌های حالت |
| جبران تأخیر زمانی | وارد کردن اثر تأخیر زمانی بین اندازه‌گیری پاسخ و عملکرد پایش |
| استفاده از شبکه عصبی و منطق فازی | پایگاه داده و پایگاه قواعد |
| استفاده از الگوریتم ژنتیک | الگوریتم ژنتیک |

در این مقاله، روشی نوین برای پایش فعال سازه‌ها ارائه می‌شود. این شیوه بر مبنای استفاده از چندین عملگر و حسگر است. در این روش، از نگره‌های دینامیک سازه‌ها استفاده می‌گردد و نیروهای عملگرها به صورت میرایی به معادله‌های تعادل دینامیکی سازه افزوده می‌شوند، به گونه‌ای که تعداد بیشتری از موده‌های پایین در وضعیت بحرانی قرار گیرند. بر پایه این فرایند می‌توان موقعیت حسگرها و عملگرها و نیروی مناسب عملگرها را برای پایش نوسان‌های سازه تعیین کرد. کارایی روش پایش پیشنهادی با حل نمونه‌های عددی ارزیابی می‌شود.

۲. مبانی و رابطه‌سازی روش پیشنهادی

معادله تعادل دینامیکی یک سازه را می‌توان با روش‌های مختلف

مانند اصل همپلتون رابطه‌سازی کرد [۸].

$$[M] \{\ddot{D}\} + [C] \{\dot{D}\} + [S] \{D\} = \{p(t)\} \quad (1)$$

که در این رابطه، $[M]$ ، $[C]$ و $[S]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه می‌باشند. همچنین $\{D\}$ و $\{p(t)\}$ به ترتیب بردارهای تغییر مکان و نیروی خارجی هستند. معادله تعادل دینامیکی در پایش فعال سازه به صورت زیر خواهد بود:

$$[M] \{\ddot{D}\} + [C] \{\dot{D}\} + [S] \{D\} + \{f^a\} = \{p(t)\} \quad (2)$$

که در آن، $\{f^a\}$ بردار نیروهای عملگرها است که به سازه وارد می‌شود. فرایند پایش هنگامی بهینه خواهد بود که بتواند نوسان‌های سازه را در کوتاه‌ترین زمان ممکن از بین ببرد. الگوی چنین فرایندی در دینامیک سازه‌ها مانند این است که یک سامانه در شرایط میرایی

انفجار حاصل آزاد شدن ناگهانی انرژی است که می‌تواند به صورت احتراق گازها، انفجار هسته‌ای، یا در اثر انواع مختلف بمب باشد. از مشخصه‌های اساسی یک انفجار می‌توان به اتفاقی بودن موقعیت انفجار، دینامیکی و گذرا بودن نیروها و زمان اثر کم اشاره کرد. هنگامی که یک انفجار صورت می‌گیرد، انرژی به صورت ناگهانی خارج می‌شود. در زمینه بارهای انفجاری، عملکرد سازه‌های هوشمند می‌تواند در کاهش آسیب‌های احتمالی بسیار مفید باشد. سازه هوشمند سازه‌ای است که بیاورد و خود را در برابر تحریک خارجی حفظ نماید. دانش سازه‌های هوشمند در قلمرو مجموعه‌ای از رشته‌ها شامل دانش مواد، مکانیک کاربردی، الکترونیک، بیومکانیک و دینامیک سازه‌ها است. حفظ عملکرد سازه در برابر عامل‌های خارجی مانند زلزله از مسائل بسیار مهم می‌باشد که با عنوان پایش سازه شناخته می‌شود. در سال‌های گذشته پژوهش‌های بسیاری در زمینه پایش سازه‌ها انجام شده است. بر این اساس، روش‌های پایش سازه‌ها را می‌توان در سه دسته غیرفعال، نیمه‌فعال و فعال تقسیم بندی نمود [۱].

به دلیل سادگی، هزینه کم و عدم نیاز به انرژی خارجی، سامانه‌های پایش غیرفعال سازه‌ها، دارای کاربردهای فراوانی می‌باشند. با وجود این، ثابت بودن ویژگی‌های پایش باعث می‌شود این سامانه‌ها قابلیت تغییر و هماهنگی با شرایط سازه به ویژه در زمان زلزله را نداشته باشند. از سوی دیگر، این سامانه‌ها تنها برای تحریک‌های خاصی که طراحی شده‌اند به کار می‌روند. لازم به ذکر است که در پایش غیرفعال سازه‌ها انرژی از سامانه خارج می‌شود. میراگرهای جرمی (TMD) یک نمونه از سامانه‌های پایش غیرفعال می‌باشند [۵-۲].

به دلیل محدودیت‌های اشاره شده، در دهه اخیر پیشگرهای فعال سازه برای مقابله با نیروی زلزله بسیار مورد توجه می‌باشد. این سامانه‌ها پاسخ بهتری در برابر تحریک‌های مختلف از خود نشان می‌دهند. کاربرد این سامانه‌ها از سال ۱۹۸۹ آغاز گردید. لازم به ذکر است که پیچیدگی، حجم بالای محاسبات و عدم قطعیت عامل‌ها از کاستی‌های سامانه‌های فعال می‌باشند. در این سامانه‌ها، عملگرها توسط منبع انرژی خارجی برای تولید نیرو تغذیه می‌شوند. در سازه‌های هوشمند، عملکرد مناسب حسگرها و عملگرها وابسته به تعیین دقیق موقعیت و نیروی اعمالی به سازه از طرف عملگرها است. الگوریتم‌های متداول در پایش فعال سازه‌ها به همراه مبانی هر روش در جدول (۱) درج شده است [۶].

سامانه‌های پایش نیمه‌فعال، از سامانه‌های غیرفعال اصلاح شده برای تنظیم ویژگی‌های مکانیکی ناشی می‌شوند. به عنوان نمونه، ابزار اتلاف انرژی، مکمل این‌گونه سامانه‌ها می‌باشند. ویژگی‌های مکانیکی این سامانه‌ها بر پایه بازخورد از پاسخ اندازه‌گیری شده و یا تحریک تنظیم می‌شوند. همانند سامانه‌های پایش فعال، در سامانه‌های نیمه‌فعال نیز پیشگر ضمن اندازه‌گیری بازخورد، فرمان‌هایی

که در آن، $f_k^a, f_j^a, \dots, f_r^a$ نیروهای n عملگر می‌باشند. همچنین ϕ_{ki} ، ϕ_{ji} و \dots به ترتیب به درایه بزرگ شکل مود نوسان i ام هستند که n عملگر به درجه‌های آزادی متناظر آن‌ها متصل شده‌اند. اکنون، جمله‌های وابسته به نیروهای عملگر به صورت الگوی میرایی لزج فرض می‌شود. در نتیجه می‌توان نوشت:

$$M_i \ddot{Z}_i + C_i \dot{Z}_i + S_i Z_i = \{\phi_i\}^T P \{t\} \quad (5)$$

که در آن، C_i میرایی معادل سازه با n عملگر در مود i ام می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$C_i^* = C_i + \left(\frac{\phi_{ki}}{Z_i}\right) f_k^a + \left(\frac{\phi_{ji}}{Z_i}\right) f_j^a + \dots + \left(\frac{\phi_{ri}}{Z_i}\right) f_r^a \quad i=1,2,\dots,n \quad (6)$$

واضح است که کوتاه‌ترین زمان از بین رفتن نوسان‌ها در شرایطی ایجاد می‌شود که میرایی‌های رابطه ۶ بحرانی گردند، یعنی:

$$C_i^* = 2M_i \omega_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (7)$$

که در آن، ω_i امین فرکانس طبیعی سازه می‌باشد. در حالت استفاده از n عملگر، n معادله از رابطه ۷ در دسترس قرار می‌گیرد که با حل این دستگاه n معادله و n مجهول، مقدار نیروهای n عملگر به دست می‌آیند. همچنین \dot{Z} سرعت مختصه مودی i ام می‌باشد که به موقعیت نصب حسگرها وابسته است. چگونگی تعیین این کمیت در بخش بعدی ارائه می‌شود. بر این اساس، نیروهای عملگرها در هر لحظه تغییر می‌کنند. برای درستی آزمایشی روش پایش فعال نوین پیشنهادی، از تحلیل‌های دینامیکی عددی استفاده می‌شود. این کار، با تحلیل دینامیکی عددی سامانه پایش شده انجام می‌پذیرد. در این شیوه، بازه زمانی تحلیل به تعداد محدودی گام زمانی کوچک تقسیم شده و در هر گام زمانی، از فرایندهای تابع اولیه‌گیری زمانی برای دستیابی به پاسخ سازه استفاده می‌شود. در این مقاله، روش نیومارک با شتاب خطی به کار می‌رود. گام‌های تحلیل دینامیکی عددی سامانه پایش شده به صورت می‌باشند.

- ۱- قراردعی $n=0$ و انتخاب گام زمانی تحلیل دینامیکی.
- ۲- تشکیل ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی سازه.
- ۳- تعیین موقعیت حسگرها و عملگرها.
- ۴- محاسبه سرعت‌های مودی.
- ۵- حل دستگاه n معادله n مجهول (رابطه ۷).
- ۶- محاسبه تغییر مکان‌های گام زمانی از روش نیومارک با شتاب خطی [۱۰].

۷- محاسبه سرعت‌های گام زمانی از روش نیومارک با شتاب خطی [۱۰].

۸- به دست آوردن بردار شتاب گام زمانی n ام با حل دستگاه خطی رابطه (۸).

$$[M]^n \{\ddot{D}\}^n = [P \{t\}] - [C]^n \{\dot{D}\}^n - [S]^n \{D\}^n - \{F^a\} \quad (8)$$

۹- به n یکی اضافه کنید.

۱۰- اگر n کمتر از n_{max} باشد، تحلیل از گام ۴ دنبال شود.

۱۱- نتایج را چاپ کنید.

باید دانست شیوه تعیین موقعیت حسگرها (گام ۳) و نیز فرایند

بحرانی قرار داشته باشد و در این حالت، نوسان‌های سامانه در کوتاه‌ترین زمان میرا خواهد شد. بنابراین، با استفاده از نگره میرایی بحرانی، می‌توان مقدار بهینه نیروی عملگرها و موقعیت مناسب عملگرها و حسگرها را به دست آورد. برای دستیابی به این هدف، رابطه ۲ به فضای مودال منتقل می‌شود.

$$M_i \ddot{Z}_i + C_i \dot{Z}_i + S_i Z_i + \{\phi_i\}^T \{F^a\} = \{\phi_i\}^T P \{t\} \quad i=1,2,\dots,q \quad (3)$$

که در آن، M_i, C_i, S_i به ترتیب مقادیرهای جرم، میرایی و سختی مختصه مودال Z_i می‌باشند. همچنین $\{\phi_i\}$ بردار شکل مود نوسان i ام ارتعاش آزاد سازه و q تعداد درجه‌های آزادی است. با بالا رفتن شماره مود (i)، اثر آن مود در پاسخ دینامیکی سازه کاهش می‌یابد. بنابراین، مودهای نوسان پایین سهم بیشتری در پاسخ دینامیکی دارند. از این ویژگی می‌توان برای محاسبه نیروی عملگرها استفاده کرد. چنانچه در سازه n عملگر وجود داشته باشد، در هر لحظه لازم است n مجهول، شامل نیروهای این عملگرها تعیین شوند. لازم به ذکر است که محاسبه n مجهول، نیازمند n معادله خواهد بود. بنابراین، بهترین راهکار تعیین نیروهای n عملگر به گونه‌ای است که n مود اول نوسان سازه بحرانی گردند. در این حالت، مناسب‌ترین شیوه پایشی در دسترس قرار می‌گیرد، زیرا بحرانی شدن میرایی n مود اول نوسان سبب از بین رفتن نوسان‌های سامانه در کوتاه‌ترین زمان خواهد شد.

لازم به ذکر است که پیش از این علامت‌یاب و رضائی پزند از این اصل استفاده کرده و پایش فعال نوسان‌های سازه را با در نظر گرفتن مود اول به تنهایی انجام داده‌اند [۹]. آن‌ها نیروی عملگر را با بحرانی کردن مود اول تعیین کرده‌اند. این فرایند دارای محدودیت‌هایی است که از آن جمله می‌توان با در نظر گرفتن تنها یک عملگر در سازه اشاره کرد. این موضوع سبب کاهش کارایی در سازه‌های با درجه آزادی زیاد می‌شود که در این مقاله، این کاستی برطرف می‌شود. به عبارت دیگر، پایش فعال در نوسان‌های سازه با چندین عملگر انجام خواهد شد. برای انجام این کار، چندین مود نخست نوسان سازه بررسی شده و رابطه سازی‌های کلی ارائه می‌شود، به گونه‌ای که طراح می‌تواند تعداد عملگرها و حسگرها را تغییر دهد. بنابراین در تحقیق حاضر، محدودیت اصلی مطالعه پیشین [۹] که همان محدود بودن تعداد حسگرها و عملگرها به یک عدد بوده برطرف گردیده و طرح پیشنهادی با توجه به در نظر گرفتن مودهای اول به جای مود اول در روابط و در نتیجه امکان استفاده از هر تعداد حسگر و عملگر کاملاً کاربردی خواهد بود. هرچه تعداد عملگرها بیشتر شوند، نوسان‌های سازه زودتر میرا خواهند شد و در این مقاله، از n عملگر استفاده می‌شود. همچنین برای تعیین موقعیت عملگرها، n درایه بزرگ مود اول انتخاب می‌شوند، به گونه‌ای که هر یک از این n عملگر به یکی از این درجه‌های آزادی متصل می‌شوند. با این کار، معادله فضای مودال در حضور n عملگر به صورت خواهد بود.

$$M_i \ddot{Z}_i + C_i \dot{Z}_i + S_i Z_i + \phi_{ki} f_k^a + \phi_{ji} f_j^a + \dots + \phi_{ri} f_r^a = \{\phi_i\}^T P \{t\} \quad (4)$$

$i=1,2,\dots,n$

باشد، دقت سرعت‌های مودی نیز بیشتر خواهد شد. به عنوان مثال، چنانچه m حسگر در سازه وجود داشته باشد، رابطه (۱۷) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\dot{Z}_i = \varphi_{iL}^{inv} \dot{D}_L + \varphi_{iM}^{inv} \dot{D}_M + \dots + \varphi_{iN}^{inv} \dot{D}_N \quad (18)$$

که در این رابطه، L, M, N درجه‌های آزادی می‌باشند که حسگرها به آن‌ها متصل شده‌اند (m حسگر). همچنین لازم به ذکر است که تعداد حسگرها را می‌توان به دلخواه انتخاب کرد. افزایش تعداد حسگرها سبب افزایش دقت سرعت‌های مودی می‌شود که افزایش دقت نیروهای عملگر را به دنبال خواهد داشت. با این وجود، محدودیت‌های اجرایی سبب می‌شود نتوان تعداد حسگرهای زیادی را به کار برد. در بخش سنجش عددی شیوه پیشنهادی، اثر تعداد حسگرها نیز ارزیابی خواهد شد. از سوی دیگر، محل نصب حسگرها دیگر عاملی است که بر سرعت‌های مودی اثرگذار است. با توجه به رابطه (۱۸)، می‌توان دریافت حسگرها باید در درجه‌های آزادی نصب شوند که درایه‌های متناظر این درجه‌های آزادی در نخستین سطر وارون ماتریس شکل نوسان دارای بیشترین مقادارها باشند. به عنوان نمونه، در حالت استفاده از یک حسگر، درجه آزادی وابسته به بزرگ‌ترین درایه در نخستین سطر وارون ماتریس شکل نوسان به عنوان محل نصب حسگر انتخاب می‌شود. استفاده از دو حسگر سبب می‌گردد آن‌ها را در درجه‌های آزادی متناظر با بزرگ‌ترین و پیش بزرگ‌ترین درایه‌ها در سطر اول وارون ماتریس شکل نوسان نصب نمود. به عنوان نمونه، در حالت وجود دو حسگر و دو عملگر می‌توان سرعت‌های مودی را از رابطه‌های زیر به دست آورد:

$$\dot{Z}_1 = \varphi_{1L}^{inv} \dot{D}_L + \varphi_{1M}^{inv} \dot{D}_M \quad (19)$$

$$\dot{Z}_2 = \varphi_{2L}^{inv} \dot{D}_L + \varphi_{2M}^{inv} \dot{D}_M \quad (20)$$

که در این رابطه‌ها، درجه‌های آزادی L و M به ترتیب دارای بزرگ‌ترین و پیش بزرگ‌ترین درایه‌ها در نخستین سطر وارون ماتریس شکل نوسان می‌باشند. به گونه مشابه، می‌توان محل نصب حسگرهای دیگر را نیز مشخص کرد.

۵. ارزیابی عددی روابط

سنجش کارایی شیوه پیشنهادی با پایش نوسان‌های یک ساختمان برشی ۵ طبقه که بار انفجاری $P(t)$ به طبقه پنجم آن وارد شده است، انجام می‌گیرد [۹]. مشخصات سختی و جرم‌های این سازه در شکل (۱) نشان داده شده است. بار انفجاری وارده به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$P(t) = \begin{cases} 200t & 0 \leq t \leq 0.5 \\ 200(1-t) & 0.5 \leq t \leq 1 \end{cases} \quad (21)$$

همچنین این سازه دارای ۵٪ میرایی در مود اول می‌باشد و دیگر مودهای نوسان آن نامیرا هستند. الگوی میرایی ریلی با دو عامل برای تعیین ماتریس میرایی سازه به کار می‌رود [۱۱]. نوسان‌های این سازه با شیوه پیشنهادی پایش می‌شود. در این روش، اثر تعداد حسگرها و عملگرها در کارایی شیوه پیشنهادی بررسی می‌شود. نخست لازم است مناسب‌ترین درجه‌های آزادی برای نصب عملگرها و حسگرها

محاسبه سرعت‌های مودی (گام ۴)، در قسمت‌های بعدی مقاله ارائه می‌گردد. در ادامه، به ارزیابی تحلیلی شیوه پایش پیشنهادی پرداخته می‌شود.

۳. تحلیل روش پیشنهادی

برای ارزیابی فرایند پیشنهادی، حالت‌های استفاده از یک، دو و سه عملگر بررسی می‌شوند. چنانچه در روش پیشنهادی تنها یک عملگر در سازه وجود داشته باشد، آنگاه نیروی عملگر از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$f_k^a = \{2M_1 \omega_1 \dot{Z}_1 - C_1 \dot{Z}_1\} / \varphi_{K1} \quad (9)$$

این رابطه با نتیجه ارائه‌شده توسط پژوهشگران پیشین سازگار می‌باشد [۹]. بنابراین، شیوه پیشنهادی بسیار کلی‌تر از شیوه‌های موجود می‌باشد. چنانچه پایش نوسان‌های سازه با دو عملگر انجام پذیرد، رابطه ۷ به دستگاه دو معادله دو مجهول زیر منجر می‌شود.

$$C_1^* = C_1 + \left(\frac{\varphi_{k1}}{Z_1}\right) f_k^a + \left(\frac{\varphi_{j1}}{Z_1}\right) f_j^a = 2M_1 \omega_1 \quad (10)$$

$$C_2^* = C_2 + \left(\frac{\varphi_{k2}}{Z_2}\right) f_k^a + \left(\frac{\varphi_{j2}}{Z_2}\right) f_j^a = 2M_2 \omega_2 \quad (11)$$

که در آن، φ_{K1} و φ_{j1} به ترتیب بزرگ‌ترین و پیش‌بزرگ‌ترین درایه‌های نخستین بردار شکل نوسان، φ_{K2} و φ_{j2} نیز به ترتیب بزرگ‌ترین و پیش‌بزرگ‌ترین درایه‌های دومین بردار شکل نوسان می‌باشند. با حل این دستگاه، نیروهای دو عملگر به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$f_k^a = \frac{\{2M_2 \omega_2 \dot{Z}_2 - C_2 \dot{Z}_2 - \frac{\varphi_{j2}}{Z_2} \dot{Z}_1 (2M_1 \omega_1 - C_1)\}}{\{\varphi_{K2} - \frac{\varphi_{j2}}{\varphi_{j1}} \varphi_{K1}\}} \quad (12)$$

$$f_j^a = 2M_1 \omega_1 \frac{\dot{Z}_1}{\varphi_{j1}} - C_1 \frac{\dot{Z}_1}{\varphi_{j1}} - \varphi_{K1} \frac{f_k^a}{\varphi_{j1}} \quad (13)$$

به گونه مشابه، استفاده از سه عملگر در پایش نوسان‌های سازه به دستگاه سه معادله، سه مجهول زیر منجر می‌شود.

$$C_1^* = C_1 + \left(\frac{\varphi_{k1}}{Z_1}\right) f_k^a + \left(\frac{\varphi_{j1}}{Z_1}\right) f_j^a + \left(\frac{\varphi_{l1}}{Z_1}\right) f_l^a = 2M_1 \omega_1 \quad (14)$$

$$C_2^* = C_2 + \left(\frac{\varphi_{k2}}{Z_2}\right) f_k^a + \left(\frac{\varphi_{j2}}{Z_2}\right) f_j^a + \left(\frac{\varphi_{l2}}{Z_2}\right) f_l^a = 2M_2 \omega_2 \quad (15)$$

$$C_3^* = C_3 + \left(\frac{\varphi_{k3}}{Z_3}\right) f_k^a + \left(\frac{\varphi_{j3}}{Z_3}\right) f_j^a + \left(\frac{\varphi_{l3}}{Z_3}\right) f_l^a = 2M_3 \omega_3 \quad (16)$$

در رابطه‌های فوق، φ_{ki} و φ_{ji} که $i=1,2,3$ می‌باشد به ترتیب بزرگ‌ترین، پیش‌بزرگ‌ترین و واپس‌بزرگ‌ترین درایه‌های i امین بردار شکل نوسان می‌باشند. با حل این دستگاه، نیروهای سه عملگر به دست می‌آیند.

۴. ارزیابی تعداد حسگرها

در رابطه سازی پیشنهادی، کمیت‌های سرعت مودی وجود دارند. بر مبنای نگره دینامیک سازه‌ها، سرعت هر مود نوسان، به سرعت‌های درجه‌های آزادی سازه وابسته است. ضریب تناسب، درایه‌های وارون ماتریس شکل نوسان می‌باشند.

$$\dot{Z}_i = \sum_{j=1}^q \varphi_{ij}^{inv} \dot{D}_j \quad (17)$$

که در آن، φ_{ij}^{inv} درایه ij از وارون ماتریس شکل نوسان است. برای تعیین سرعت‌های مودی (\dot{Z}_i)، لازم است دو عامل تعداد حسگرها و محل نصب حسگرها مشخص گردند. هر چه تعداد حسگرها بیشتر

جدول ۳. حالت‌های مختلف پایش فعال سازه پنج طبقه

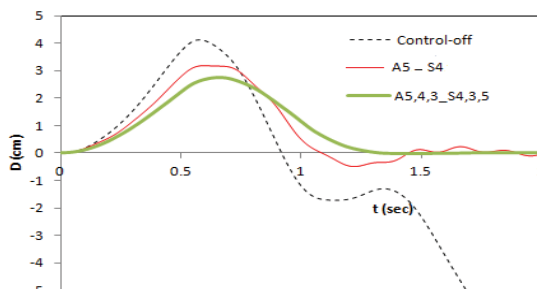
| حالت | مشخصه‌های سامانه پایش |
|---------------------------|---|
| Control off | سازه بدون سامانه پایش |
| $A_{5,4}-S_4$ | سازه دارای یک عملگر (در درجه آزادی ۵) و یک حسگر (در درجه آزادی ۴) |
| $A_{5,4,3}-S_{4,3}$ | سازه دارای دو عملگر و دو حسگر |
| $A_{5,4,3}-S_4$ | سازه دارای سه عملگر و یک حسگر |
| $A_{5,4,3}-S_{4,3}$ | سازه دارای سه عملگر و دو حسگر |
| $A_{5,4,3}-S_{4,3,5}$ | سازه دارای سه عملگر و سه حسگر |
| $A_{5,4,3}-S_{4,3,5,2}$ | سازه دارای سه عملگر و چهار حسگر |
| $A_{5,4,3}-S_{4,3,5,2,1}$ | سازه دارای سه عملگر و پنج حسگر |

جدول ۴. جدول مقایسه بیشینه تغییر مکان طبقات در حالت‌های مختلف

پایش بر اساس الگوریتم پیشنهادی

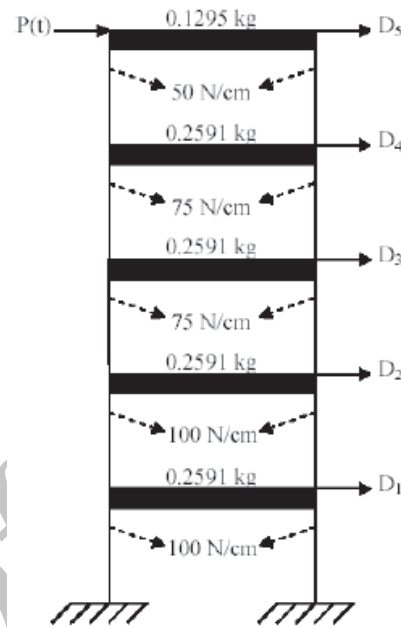
| حالت پایش | طبقه ۱ | طبقه ۲ | طبقه ۳ | طبقه ۴ | طبقه ۵ |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Control off | ۰/۷۵ | ۱/۴۷ | ۲/۳۶ | ۳/۱۳ | ۴/۱۰ |
| $A_{5,4}-S_4$ | ۰/۶۱ | ۱/۱۸ | ۱/۸۶ | ۲/۴۵ | ۳/۱۸ |
| $A_{5,4}-S_{4,3}$ | ۰/۵۹ | ۱/۱۲ | ۱/۷۶ | ۲/۳۴ | ۳/۰۷۸ |
| $A_{5,4,3}-S_4$ | ۰/۶۵ | ۱/۱۵ | ۱/۹۱ | ۲/۴۳ | ۳/۲۷ |
| $A_{5,4,3}-S_{4,3}$ | ۰/۵۳ | ۱/۰۲۴ | ۱/۶۴ | ۲/۲۱ | ۳/۱۳ |
| $A_{5,4,3}-S_{4,3,5}$ | ۰/۴۸ | ۰/۹۲ | ۱/۴۵ | ۱/۹۸ | ۲/۷۵ |
| $A_{5,4,3}-S_{4,3,5,2}$ | ۰/۴۲ | ۰/۸۴ | ۱/۳۷ | ۱/۹۰ | ۲/۶۸ |
| $A_{5,4,3}-S_{4,3,5,2,1}$ | ۰/۴۱ | ۰/۸۱ | ۱/۳۶ | ۱/۸۹ | ۲/۶۷ |

بر اساس نتایج جدول (۴)، در حالت استفاده از یک حسگر و یک عملگر، تغییر مکان طبقات بالایی حدود ۲۲ درصد کاهش می‌یابد. بر اساس جدول نتایج، در صورت استفاده از سه عملگر و تنها یک حسگر افزایش تعداد عملگرها نسبت به حالت استفاده از یک عملگر (به همراه یک حسگر) نتیجه مثبتی در زمینه کاهش بیشینه تغییر مکان‌ها نخواهد داشت. در صورت استفاده از سه عملگر و سه حسگر، بیشینه تغییر مکان طبقه‌های بالایی را تا ۳۵ درصد کاهش می‌دهد. نمودار شکل (۲) نحوه تغییرات مقدار تغییر مکان بر حسب زمان را در سه حالت بدون کنترل، استفاده از یک حسگر و یک عملگر و استفاده از سه عملگر و سه حسگر نشان می‌دهد. عامل دیگری که در ارزیابی عددی روش پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بیشینه انرژی جنبشی سازه در بازه زمانی تحلیل دینامیکی است.



شکل ۲. مقایسه تغییرات مقدار تغییر مکان بر حسب زمان در سه حالت کنترل

تعیین گردند. این کار با توجه به درایه‌های نخستین بردار شکل نوسان و نخستین سطر از وارون ماتریس شکل نوسان انجام می‌گیرد. اولویت‌های نصب حسگرها و عملگرها در جدول (۲) مشخص شده است. این کار با استفاده از اصول بخش‌های پیشین انجام می‌پذیرد.



شکل ۱. ساختمان ۵ طبقه برشی [۱۱]

جدول ۲. اولویت‌های نصب حسگرها و عملگرها

| اولویت حسگر | اولویت عملگر | φ_{IL}^{inv} | φ_{k1} | درجه آزادی |
|-------------|--------------|----------------------|----------------|------------|
| ۵ | ۵ | ۰/۱۹۲۲ | ۰/۱۵۶۵ | ۱ |
| ۴ | ۴ | ۰/۳۶۷۳ | ۰/۲۹۹۱ | ۲ |
| ۲ | ۳ | ۰/۵۵۷۶ | ۰/۴۵۴۱ | ۳ |
| ۱ | ۲ | ۰/۶۸۲۱ | ۰/۵۵۵۵ | ۴ |
| ۳ | ۱ | ۰/۳۷۴۱ | ۰/۶۰۹۳ | ۵ |

در ارزیابی عددی روش پیشنهادی، ۳ عامل در حالت‌های مختلف پایش فعال سازه در نظر گرفته می‌شود. این عوامل شامل بیشینه تغییر مکان طبقات، بیشینه انرژی جنبشی سازه و مجموع بیشینه تغییر مکان‌های نسبی طبقات نسبت به یکدیگر می‌باشند. جهت مقایسه پارامترهای ذکر شده در حالت‌های مختلف کنترل با تعداد متفاوت حسگر و عملگر، روابط بیان شده در روش پیشنهادی شامل مقدار نیروی لحظه‌ای عملگر به همراه روابط و گام‌های تحلیل دینامیکی (بخش ۲) توسط نرم‌افزار متلب برنامه‌نویسی شده و نتایج عددی جهت مقایسه در حالت‌های مختلف کنترل حاصل می‌شود. با استفاده از نتایج جدول (۲)، می‌توان الگوریتم‌های مختلف پایش را با توجه به تعداد عملگرها و حسگرها مطرح کرد. این کار در جدول (۳) انجام شده است. جدول (۴) بیشینه مقدارهای تغییر مکان را در حالت‌های مختلف پایش تحت اثر بار انفجاری ارائه می‌کند.

نسبی در طبقات در حالت‌های مختلف پایش فعال سازه پنج درجه آزادی بررسی گردید. بر اساس نتایج عددی، در حالت استفاده از یک حسگر و عملگر تغییر مکان طبقه‌های بالایی نسبت به حالت بدون استفاده از سامانه پایش فعال حدود ۲۲ درصد کاهش می‌یابد. همچنین استفاده از سه عملگر و سه حسگر در موقعیت‌های مناسب، بیشینه تغییر مکان طبقات بالایی را تا ۳۵ درصد کاهش می‌دهد. در خصوص بیشینه انرژی جنبشی سامانه، استفاده از یک عملگر و یک حسگر در موقعیت‌های مناسب، این مقدار را حدود ۷۲ درصد کاهش می‌دهد. بیشینه مجموع مقادیر تغییر مکان نسبی در طبقات نیز در هنگام استفاده از سه عملگر و سه حسگر حدود ۹۰ درصد کم می‌شود. همچنین در همه حالت‌های استفاده از دو یا سه عملگر با دو یا سه حسگر، اثرگذارترین سامانه هنگامی به دست می‌آید که حسگرها در موقعیت متناظر با بیشترین (دو مقدار یا سه مقدار بیشتر) مقادیر ردیف اول وارون ماتریس شکل نوسان قرار گیرند.

۷. مراجع

- [1] Akutagawa, S.; Otsuki, M.; Kitagawa, Y. "Hybrid Control System with Optimal Fuzzy Logic and Genetic Algorithm For High-Rise Buildings"; 13th World Conf. on Earthquake Eng., Vancouver, B.C., Canada, 2004.
- [2] Guclu, R.; Yazici, H. "Vibration Control of a Structure with ATMD Against Earthquake Using Fuzzy Logic Controllers"; J. Sound and Vibrations 2008, 318, 36-49.
- [3] Chen, G.; Wu, J. "Optimal Placement of Multiple Tune Mass Dampers for Seismic Structures"; ASCE J. Structural Eng. 2001, 127, 1054-1062.
- [4] Rudinger, F. "Tuned Mass Damper with Nonlinear Viscous Damping"; J. Sound and Vibrations 2007, 300, 932-948.
- [5] Hoang, N.; Fujino, Y.; Warnitchai, P. "Optimal Tuned Mass Damper for Seismic Applications and Practical Design Formulas"; Eng. Structures 2008, 30, 707-715.
- [6] Datta, T. K. "A State of the Art Review on Active Control of Structures"; 22nd ISET Annual Lecture, ISET J. Earthquake Tech. 2003, 40, 1-17.
- [7] Symans, M. D.; Constantinou, M. C. "Semi-Active Control Systems for Seismic Protection of Structures: a State-of-the-Art Review"; Eng. Structures 1999, 21, 469-487.
- [8] Korayem, M. H.; Alipour, A. "Dynamic Analysis of Moving Cables with Variable Tension and Variable Speed"; Int. J. Eng. 2010, 23, 157-168.
- [9] Alamatian, J.; Rezaeepazhand, J. "A simple Approach for Determination of Actuator and Sensor Locations in Smart Structures Subjected to the Dynamic Loads"; Int. J. Eng. Transactions A: Basics 2011, 24, 341-349.
- [10] Dukkupati, R. V. "Matlab an Introduction and Applications"; New Age Publishers, 2010.
- [11] Clough, R. W.; Penzien, J. "Dynamics of Structures"; McGraw Hill, New York, 1993.

جدول (۵) تغییرات بیشینه انرژی جنبشی سازه در این بازه و در حالت‌های مختلف پایش را نشان می‌دهد. بر این اساس، راهکار پایشی پیشنهادی، کارایی بسیار مناسبی در کاهش انرژی جنبشی سامانه دارد، به گونه‌ای که با افزایش تعداد عملگرها، انرژی جنبشی سازه کاهش چشم گیری دارد. همچنین چگونگی تغییر بیشینه مجموع تغییر مکان‌های نسبی طبقات سازه که از پارامترهای بسیار مهم و شاخص اصلی در آسیب است، در بازه زمانی تحلیل دینامیکی در حالت‌های مختلف پایش بررسی شده است. جدول (۶) این تغییرات را بیان می‌کند. روشن است که کارایی روش پیشنهادی با افزایش تعداد عملگرها بیشتر می‌شود.

جدول ۵. مقایسه بیشینه تغییرات انرژی جنبشی سازه در بازه زمانی تحلیل دینامیکی در حالت‌های مختلف پایش

| حالت پایش | بیشینه انرژی جنبشی |
|--|--------------------|
| Control off | ۷۷/۷۸ |
| A ₅ -S ₄ | ۲۱/۹۸ |
| A _{5,4} -S _{4,3} | ۱۸/۴۲ |
| A _{5,4,3} -S _{4,3,5} | ۸/۱۰۵ |
| A _{5,4,3} -S _{4,3,5,2} | ۷/۱۹۸ |
| A _{5,4,3} -S _{4,3,5,2,1} | ۷/۰۷۷ |

جدول ۶. بیشینه مجموع تغییر مکان‌های نسبی طبقات در حالت‌های مختلف پایش سازه

| حالت پایش | بیشینه مجموع مقادیر Drift در طبقات |
|--|------------------------------------|
| Control off | ۳/۴۰ |
| A ₅ -S ₄ | ۲/۶۶ |
| A _{5,4} -S _{4,3} | ۲/۵۲ |
| A _{5,4,3} -S _{4,3} | ۲/۶۳ |
| A _{5,4,3} -S _{4,3,5} | ۲/۲۶ |
| A _{5,4,3} -S _{4,3,5,2} | ۲/۲۶ |

۶. نتیجه گیری

در این پژوهش، یک شیوه نوین برای پایش فعال نوسان‌های سازه ارائه گردید. این فرایند، بر پایه نگره‌های دینامیک سازه‌ها رابطه‌سازی شد و در آن، نوسان‌های سازه با چند عملگر و حسگر پایش می‌شوند. در الگوی پیشنهادی، نیروهای عملگرها همانند نیروهای میرایی لزوج پنداشته شدند و تلاش گردید نیروهای عملگرها به گونه‌ای محاسبه شوند که تعداد بیشتری از میرایی موده‌های نوسان پایین سازه بحرانی شوند. برای بررسی روش پیشنهادی تغییرات بیشینه تغییر مکان، بیشینه انرژی جنبشی سامانه و بیشینه مجموع مقادیر تغییر مکان