



شیوه نوین برای پایش و کنترل فعال نوسان‌های سازه-های هوشمند با چندین حسگر و عملگر

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

^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه شاهرود، شاهرود

^۲ استادیار گروه عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

^۳ استادیار، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، مشهد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۰۹/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۲۳

چکیده

در این مقاله روش نوینی برای پایش فعال نوسان‌های سازه‌ها ارائه می‌گردد. رابطه‌سازی این فرایند بر پایه اصول دینامیک سازه‌ها می‌باشد و در آن نوسان‌های سازه با چندین عملگر و حسگر پایش می‌شود. در اینجا، نیروی هر عملگر به صورت نیروی معادل میرایی لزوج پنداشته شده و تلاش می‌گردد نیروهای عملگرها به گونه‌ای محاسبه شوند که تعداد بیشتری از میرایی مودهای نوسان پایین سازه بحرانی شوند. با این کار، نیروهای عملگرها در یک فرایند ریاضی ساده به دست می‌آید. روش پیشنهادی جهت مقابله با نیروهای زلزله، باد و انفجار قابل استفاده می‌باشد. 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 بررسی می‌گردد. نتایج عددی نشان می‌دهند، شیوه پایش فعال پیشنهادی عملکرد مناسبی در کاهش نوسان‌های سازه دارد. مطابق نتایج بدست آمده، بیشینه تغییر مکان طبقات بالایی با تعداد عملگر و حسگر مناسب در سازه ۵ درجه آزادی تا ۷۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین بیشینه انرژی جنبشی سازه با استفاده از یک عملگر و یک حسگر در موقعیت‌های مناسب حدود ۹۰ درصد کاهش خواهد داشت.

کلمات کلیدی: سازه هوشمند؛ پایش فعال؛ حسگر؛ عملگر؛ تغییرمکان؛ انرژی جنبشی.

New approach for active control of smart structure's vibrations using multi actuators and sensors

B. Karimpoor^{1,*}, A. Kayhani² and J. Alamatian³

¹ Ph.D. Student, Civil Eng., Shahrood University, Shahrood, Iran

² Assist. Prof., Civil Eng., Shahrood University, Shahrood, Iran

³ Assist. Prof., Department of Civil Eng., Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

Abstract

In this paper new approach is presented for controlling the structural vibrations. 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 multi degrees of freedom. For numerical verification of proposed method, several criterions such as maximum displacement, maximum kinetic energy and maximum drift are evaluated in five story shear building, excited by harmonic load. This study shows that the proposed method has suitable efficiency for reducing structural vibrations. According to the results, the maximum shift in the structure of the upper floors 5 degrees of freedom are reduced by 75%.

Keywords: Smart structure; Active control; Actuator; Sensor; Displacement; Kinetic energy.

۱- مقدمه

سازه هوشمند سازه‌ای است که بیاموزد 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، نیمه فعال و فعال تقسیم بندی نمود [۱].

بدلیل سادگی، هزینه کم و عدم نیاز به انرژی خارجی، سامانه‌های پایش غیر فعال 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 شده اند به کار می‌روند. باید دانست در پایش غیر فعال سازه‌ها انرژی از سامانه خارج می‌شود. میراگرهای جرمی (TMD) یک نمونه از سامانه‌های پایش غیر فعال می‌باشند [۲-۵].

به دلیل محدودیت‌های اشاره شده، در دهه اخیر پایشگرهای 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. باید دانست، 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 می‌باشد. الگوریتم‌های متداول در پایش فعال سازه‌ها به همراه مبانی هر روش در جدول ۱ درج شده اند [۶].

سامانه‌های پایش نیمه فعال از سامانه‌های غیر فعال اصلاح شده برای تنظیم ویژگی‌های مکانیکی ناشی می‌شوند. به عنوان نمونه، ابزار اتلاف انرژی مکمل از این گونه سامانه‌ها می‌باشند. ویژگی‌های مکانیکی این سامانه‌ها بر پایه بازخورد از پاسخ اندازه‌گیری شده و یا تحریک تنظیم می‌شوند.

همانند سامانه‌های پایش فعال، در سامانه‌های نیمه فعال نیز پایشگر ضمن اندازه‌گیری بازخورد، فرمانهایی برای ابزار پایش نیمه فعال تولید می‌کند. همچنین در سامانه‌های نیمه فعال، همانند سامانه‌های غیر فعال، نیروهای پایش به عنوان نتیجه‌ای از حرکت سازه می‌باشند و بر اساس تنظیم مناسب ویژگی‌های مکانیکی سامانه پایش نیمه فعال 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 کران دار	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 سازه ای، سرعت و شتاب
پایش مود لغزشی (SMC)	تولید سطح لغزش شامل ترکیب خطی از عامل‌های حالت
جبران تاخیر زمانی	وارد کردن اثر تاخیر 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، روش نوینی برای پایش فعال سازه‌ها ارائه می‌گردد. این شیوه بر مبنای استفاده از چندین عملگر و حسگر می‌باشد. در این راه از نگره‌های دینامیک سازه‌ها استفاده می‌گردد و نیروهای عملگرها به صورت میرایی به معادله‌های تعادل دینامیکی سازه افزوده می‌شوند، به گونه ای 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 می‌گردد.

۲- مبانی و رابطه سازی روش پیشنهادی

معادله تعادل دینامیکی یک سازه را می توان با روشهای مختلف مانند اصل همیلتون رابطه سازی کرد [۸].

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

در این رابطه $[M]$ ، $[C]$ و $[S]$ به ترتیب ماتریس های جرم، میرایی و سختی سازه می باشند. 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.

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

در اینجا $\{f^a\}$ بردار نیروهای عملگرها می باشد که به سازه وارد می شود. فرایند پایش هنگامی بهینه خواهد بود که بتواند نوسانهای سازه را در کوتاهترین زمان ممکن از بین ببرد. الگوی چنین فرایندی در دینامیک سازه ها مانند این است که یک سامانه در شرایط میرایی بحرانی قرار داشته باشد. در این حالت، نوسانهای سامانه در کوتاهترین زمان میرا خواهد شد. بنابراین با استفاده از نگره میرایی بحرانی می توان 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 می شود.

$$M_i \ddot{Z}_i + C_i \dot{Z}_i + S_i Z_i + \{\varphi_i\}^T \{f^a\} = \{\varphi_i\}^T P \{t\} \quad (3)$$

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

در این رابطه M_i ، C_i ، S_i به ترتیب مقادیرهای جرم، میرایی و سختی مختصه مودال Z_i می باشند. همچنین $\{\varphi_i\}$ بردار شکل مود نوسان i ام ارتعاش آزاد سازه و q تعداد درجه های آزادی است. با بالا رفتن شماره مود (i) اثر آن مود در پاسخ دینامیکی سازه کاهش می یابد. بنابراین، مودهای نوسان پایین سهم بیشتری در پاسخ دینامیکی دارند. می توان از این ویژگی 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. محاسبه این n مجهول نیازمند n معادله خواهد بود. از این رو، بهترین راهکار، تعیین نیروهای n عملگر به گونه ای است که n مود اول نوسان سازه بحرانی گردند. در این حالت، مناسبترین شیوه پایشی در دسترس قرار می گیرد؛ زیرا بحرانی شدن میرایی n مود اول نوسان سبب از بین رفتن نوسانهای سامانه در کوتاه ترین زمان خواهد شد.

پیش از این علامتین و رضائی پژوهش از این اصل استفاده کرده اند و پایش فعال نوسانهای سازه را با در نظر گرفتن مود اول به تنهایی انجام داده اند [۹]. آنها نیروی عملگر را با بحرانی کردن مود اول تعیین کردند. این فرایند دارای محدودیت هایی است که از آن جمله می توان به در نظر گرفتن تنها یک عملگر در سازه اشاره کرد. این موضوع سبب کاهش کارایی در سازه های با درجه های آزادی زیاد می گردد. در این مقاله این کاستی برطرف می شود. به سخن 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 سازی های کلی ارائه می گردد، به گونه ای که طراح می تواند تعداد عملگرها و حسگرها را تغییر دهد. هرچه تعداد عملگرها بیشتر شوند نوسانهای سازه زودتر میرا خواهند شد. در این مقاله، از n عملگر استفاده می شود. همچنین برای تعیین موقعیت عملگرها، n درایه بزرگ مود اول انتخاب می گردند؛ به گونه ای که هر یک از این n عملگر به یکی از این درجه های آزادی متصل می شوند. با این کار، معادله فضای مودال در حضور n عملگر بصورت زیر خواهد بود.

$$M_i \ddot{Z}_i + C_i \dot{Z}_i + S_i Z_i + \varphi_{ki} f_k^a + \varphi_{ji} f_j^a + \dots + \varphi_{ni} f_n^a = \{\varphi_i\}^T P \{t\} \quad (4)$$

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

در رابطه بالا، f_k^a ، f_j^a ، f_n^a و \dots نیروهای n عملگر می باشند. همچنین φ_{ki} ، φ_{ji} ، φ_{ni} و \dots به ترتیب n درایه بزرگ شکل مود نوسان i ام هستند که n عملگر به درجه های آزادی متناظر آنها متصل شده اند. اکنون، جمله های وابسته به نیروهای عملگر به صورت الگوی میرایی لزج فرض می گردد. در نتیجه می توان نوشت:

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

در اینجا C_i^* ، میرایی معادل سازه با n عملگر در مود i ام می باشد و به صورت زیر تعریف می گردد.

$$C_i^* = C_i + \left(\frac{\varphi_{ki}}{Z_i}\right) f_k^a + \left(\frac{\varphi_{ji}}{Z_i}\right) f_j^a + \dots + \left(\frac{\varphi_{ni}}{Z_i}\right) f_n^a \quad (6)$$

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

روشن است، کوتاهترین زمان از بین رفتن نوسانها در شرایطی ایجاد می شود که میرایی های رابطه ۶ بحرانی گردند. یعنی:

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

در این رابطه ω_i i امین فرکانس طبیعی سازه می باشد. در حالت استفاده از n عملگر n معادله از رابطه ۷ در دسترس

مقاله ارائه می‌گردد. در ادامه به ارزیابی تحلیلی شیوه پایش پیشنهادی پرداخته می‌شود.

۳- ارزیابی تحلیلی شیوه پایش 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 بدست می‌آید.

$$f_k^a = \{2M_1\omega_1 \dot{Z}_1 - C_1 \dot{Z}_1\} / \varphi_{k1} \quad (9)$$

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

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

$$= 2M_1\omega_1$$

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

$$= 2M_2\omega_2$$

در اینجا φ_{k1} و φ_{j1} به ترتیب بزرگترین و پیش بزرگترین درایه‌های نخستین بردار شکل نوسان φ_{k2} و φ_{j2} نیز به ترتیب بزرگترین و پیش بزرگترین درایه‌های دومین بردار شکل نوسان می‌باشند. با حل این دستگاه نیروهای دو عملگر بصورت زیر بدست می‌آیند.

$$f_k^a = \frac{\{2M_2\omega_2 \dot{Z}_2 - C_2 \dot{Z}_2 - \frac{\varphi_{j2}}{\varphi_{j1}} \dot{Z}_1 (2M_1\omega_1 - C_1)\}}{\{\varphi_{k2} - \frac{\varphi_{j2}}{\varphi_{j1}} \varphi_{k1}\}} \quad (12)$$

$$f_j^a = 2M_1\omega_1 \frac{\dot{Z}_1}{\varphi_{j1}} - C_1 \frac{\dot{Z}_1}{\varphi_{j1}} - \varphi_{k1} \frac{f_k^a}{\varphi_{j1}} \quad (13)$$

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

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

$$= 2M_1\omega_1$$

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

$$= 2M_2\omega_2$$

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

$$= 2M_3\omega_3$$

قرار می‌گیرد که با حل این دستگاه n معادله و n مجهول مقدارهای نیروهای n عملگر به دست می‌آیند. همچنین \dot{Z}_i سرعت مختصه مودی i ام می‌باشد که به موقعیت نصب حسگرها وابسته است. چگونگی تعیین این کمیت در بخش بعدی ارائه می‌گردد. باید دانست، نیروهای عملگرها از حل دستگاه n معادله n مجهول رابطه ۷ به دست می‌آیند. بر این اساس نیروهای عملگرها در هر لحظه تغییر می‌کنند و مقدار آنها توسط سامانه پایش فعال و از حل دستگاه معادله‌های ۷ در دسترس قرار می‌گیرند. برای راستی آزمایی روش پایش فعال نوین پیشنهادی از تحلیلهای دینامیکی عددی استفاده می‌گردد. این کار با تحلیل دینامیکی عددی سامانه پایش شده انجام می‌پذیرد. در این شیوه، بازه زمانی تحلیل به تعداد محدودی گام زمانی کوچک تقسیم می‌گردد و در هر گام زمانی از فرایندهای تابع اولیه گیری زمانی برای دستیابی به پاسخ سازه بهره جویی می‌شود. در این مقاله روش نیومارک با شتاب خطی به کار می‌رود. گام‌های تحلیل دینامیکی عددی سامانه پایش شده به صورت زیر اند.

- 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 تغییرمکانهای گام زمانی از روش نیومارک با شتاب خطی [۱۰].
 - ۷- محاسبه سرعت‌های گام زمانی از روش نیومارک با شتاب خطی [۱۰].
 - ۸- بردار شتاب گام زمانی n ام را با حل دستگاه خطی رابطه زیر بدست آورید.
- $$[M]^n \{\ddot{D}\}^n = \{p(t^n)\} - [C]^n \{\dot{D}\}^n - [S]^n \{D\}^n - \{F^n\} \quad (A)$$
- 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 محاسبه سرعت‌های مودی (گام ۴)، در قسمتهای بعدی

شوند که درایه های متناظر این درجه های آزادی در نخستین سطر وارون ماتریس شکل نوسان دارای بیشترین مقادیر 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 می شود. استفاده از دو حسگر سبب می گردد آنها را در درجه های آزادی متناظر با بزرگترین و پیش بزرگترین درایه ها در سطر اول وارون ماتریس شکل نوسان نصب نمود. به عنوان نمونه، در حالت وجود دو حسگر و دو عملگر می توان سرعت های مودی را از رابطه های زیر یافت.

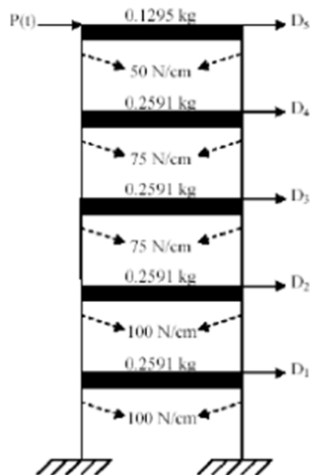
$$\dot{Z}1 = \varphi_{1L}^{inv} \dot{D}_L + \varphi_{1M}^{inv} \dot{D}_M \quad (19)$$

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

در اینجا، درجه های آزادی M و L به ترتیب دارای بزرگترین و پیش بزرگترین درایه ها در نخستین سطر وارون ماتریس شکل نوسان می باشند. به گونه مشابه، می توان 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 هارمونیک $P(t) = 50\sin(10t)$ به طبقه پنجم آن وارد شده است، انجام می پذیرد [۹]. مشخصات سختی و جرمهای این سازه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- ساختمان ۵ طبقه برشی [۱۱]

در اینجا φ_{ji} و φ_{ki} و φ_{ij} که $i=1,2,3$ به ترتیب بزرگترین، پیش بزرگترین و واپیش بزرگترین درایه های i امین بردار شکل نوسان می باشند. با حل این دستگاه نیروهای سه عملگر بدست می آیند.

نیروهای عملگرها همانند نیروهای دینامیکی در معادلات وارد می شوند. این نیروها سبب غیر خطی شدن معادله نوسان می گردند. در الگوریتم پیشنهادی از روش نیومارک جهت حل معادله نوسان استفاده می شود. در حالی که پایداری روش نیومارک در مسائل خطی به اثبات رسیده است، در مسائل غیر خطی می توان با کوچک کردن گامهای زمانی پایداری را تضمین نمود.

۴- ارزیابی تعداد حسگرها

در رابطه سازی پیشنهادی، کمیت های سرعت های مودی وجود دارند. بر مبنای نگره دینامیک سازه ها، سرعت هر مود نوسان، به سرعت های درجه های آزادی سازه وابسته است. ضریب تناسب، درایه های وارون ماتریس شکل نوسان می باشند:

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

در اینجا φ_{ij}^{inv} درایه ij از وارون ماتریس شکل نوسان است. برای تعیین سرعت های مودی (\dot{Z}_i) ، لازم است دو عامل تعداد حسگرها و محل نصب حسگرها مشخص گردند. هر چه تعداد حسگرها بیشتر باشد، دقت سرعت های مودی نیز بیشتر خواهد شد. به عنوان نمونه، چنانچه m حسگر در سازه وجود داشته باشد، رابطه ۱۷ بصورت زیر نوشته می شود:

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

در این رابطه L و M و N درجه های آزادی می باشند که حسگرها به آنها متصل شده اند (m حسگر). شایان توجه است، تعداد حسگرها را می توان به دلخواه انتخاب کرد. افزایش تعداد حسگرها سبب افزایش دقت سرعت های مودی می شود که افزایش دقت نیروهای عملگر را به دنبال خواهد داشت. با این وجود، محدودیت های اجرایی سبب می گردد 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 سرعت های مودی اثر گذار می باشد. با توجه به رابطه ۱۸ می توان دریافت حسگرها باید در درجه های آزادی نصب

عبارتند از بیشینه تغییر مکان طبقات، بیشینه انرژی جنبشی سازه و مجموع بیشینه تغییر مکانهای نسبی طبقات نسبت به یکدیگر. جدول ۴ بیشینه مقادیرهای تغییر مکان را در حالت های مختلف پایش ارائه می کند.

جدول ۴- جدول مقایسه بیشینه تغییر مکان طبقات

حالت	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵
Control off	۱/۲۱۵	۲/۲۸۸	۳/۳۶۸	۳/۹۳۹	۳/۹۱۲
A ₅ -S ₄	۰/۴۱۴	۰/۷۶۹	۱/۱۳۹	۱/۳۰۱	۱/۳۰۵
A _{5,4} -S ₄	۰/۳۸۸	۰/۶۶۶	۰/۹۸۳	۱/۱۶۱	۱/۱۲۵
A _{5,4,3} -S ₄	۰/۴۴۰	۰/۸۴۶	۱/۱۳۷	۱/۳۱۴	۱/۳۷۳
A _{5,4,3} -S _{4,3}	۰/۲۸۴	۰/۵۲۲	۰/۷۷۶	۰/۹۶۰	۱/۳۳۵
A _{5,4,3} -S _{4,3,5}	۰/۲۱۷	۰/۴۱۷	۰/۵۵۳	۰/۷۵۶	۰/۹۸۳
A _{5,4,3} -S _{4,3,5,2}	۰/۱۷۳	۰/۳۲۲	۰/۴۹۸	۰/۷۱۹	۰/۹۸۹
A _{5,4,3} -S _{4,3,5,2,1}	۰/۱۵۸	۰/۲۹۳	۰/۴۹۳	۰/۷۱	۰/۹۸۸

بر اساس نتایج جدول ۴، در حالت استفاده از یک حسگر و یک عملگر تغییر مکان طبقات بالایی تحت بار هارمونیک حدود ۶۵ درصد کاهش می یابد. همچنین، در حالت استفاده از دو عملگر و یک حسگر تغییر مکان طبقات بالایی حدود ۷۲ درصد کاهش می یابد. بر اساس جدول نتایج، در صورت استفاده از سه عملگر و تنها یک حسگر افزایش تعداد عملگرها نسبت به حالت استفاده از دو عملگر (به همراه یک حسگر) نتیجه مثبتی در زمینه کاهش بیشینه تغییر مکانها نخواهد داشت. در صورت استفاده از سه عملگر و دو حسگر بیشینه تغییر مکان طبقه های بالایی را تا ۷۵ درصد کاهش می دهد. در حالت استفاده از سه عملگر به همراه سه حسگر نیز حداکثر تغییر مکان در طبقه های بالایی حدود ۸۰ درصد برای طبقه چهار و حدود ۷۵ درصد برای طبقه پنجم کاهش می یابد.

عامل دیگری که در ارزیابی عددی روش پیشنهادی مورد استفاده قرار می گیرد، بیشینه انرژی جنبشی سازه در بازه زمانی تحلیل دینامیکی می باشد. جدول ۵ تغییرات بیشینه انرژی جنبشی سازه را در این بازه در حالت های مختلف پایش را نشان می دهد. بر این اساس، راهکار پایشی پیشنهادی کارایی بسیار مناسبی در کاهش انرژی جنبشی سامانه دارد،

همچنین این سازه دارای ۵٪ میرایی در مود اول می باشد و دیگر مودهای نوسان آن نامیرا هستند. الگوی میرایی ریلی با دو عامل برای تعیین ماتریس میرایی سازه به کار می رود [۱۱]. نوسانهای این سازه با شیوه پیشنهادی پایش می گردد. در این راه، اثر تعداد حسگرها و عملگرها در کارایی شیوه پیشنهادی بررسی می شود. نخست لازم است مناسبترین درجه های آزادی برای نصب عملگرها و حسگرها تعیین گردند. این کار با توجه به درایه های نخستین بردار شکل نوسان و نخستین سطر از وارون ماتریس شکل نوسان انجام می پذیرد. اولویتهای نصب حسگرها و عملگرها در جدول ۲ مشخص شده اند. این کار با استفاده از اصول بخشهای پیشین انجام می پذیرد. با استفاده از نتایج جدول ۲، می توان الگوریتمهای مختلف پایش را با توجه به تعداد عملگرها و حسگرها مطرح کرد. این کار در جدول ۳ انجام شده است.

جدول ۲- اولویت های نصب حسگرها و عملگرها

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

جدول ۳- حالت های مختلف پایش فعال سازه پنج طبقه

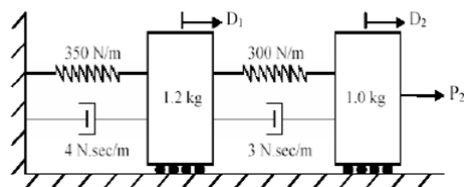
حالت	مشخصه های سامانه پایش
Control off	سازه بدون سامانه پایش
A ₅ -S ₄	سازه دارای یک عملگر (در درجه آزادی ۵) و یک حسگر (در درجه آزادی ۴)
A _{5,4} -S ₄	سازه دارای دو عملگر و یک حسگر
A _{5,4,3} -S ₄	سازه دارای سه عملگر و یک حسگر
A _{5,4,3} -S _{4,3}	سازه دارای سه عملگر و دو حسگر
A _{5,4,3} -S _{4,3,5}	سازه 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

در ارزیابی عددی روش پیشنهادی ۳ عامل در حالت های مختلف پایش فعال سازه در نظر گرفته می شود. این عامل ها

جدول ۷- جدول مقایسه بیشینه تغییر مکان طبقات تحت بار زلزله السنترو بر اساس الگوریتم پیشنهادی

حالت پایش	طبقه ۴	طبقه ۵
Control off	۱۲	۱۳.۳
A ₅ -S ₄	۶.۹۹	۷.۶۶
A _{5,4} -S _{4,3}	۶.۳	۷
A _{5,4,3} -S ₄	۷	۷.۶
A _{5,4,3} -S _{4,3}	۵.۳۶	۵.۹۹

برای بررسی نحوه عملکرد روش پیشنهادی در سازه‌ها با تعداد درجات آزادی کمتر و همچنین نحوه عملکرد در برابر بارهای مختلف، سازه دو درجه آزادی شکل دو در نظر گرفته می‌شود. سازه دو درجه آزادی مطرح شده قبلاً توسط کاراگولی و مالگاکا بررسی گردیده است [۱۲].



$$P_2 = \begin{cases} 1/\Delta t & t = \Delta t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

شکل ۲- سیستم دو درجه آزادی

در سیستم مذکور در زمان استفاده از یک حسگر و یک عملگر حالت بهینه قرارگیری حسگر و عملگر مطابق جدول زیر تعیین می‌شود.

جدول ۸- حالت بهینه قرارگیری حسگر و عملگر در سیستم دو درجه آزادی

حالت کنترل بهینه	ϕ_{1Lin}	ϕ_{k1}	درجه آزادی
A ₂ -S ₂	۰.۵۸۳۱	۰.۵۱۱۳	۱
	۰.۸۱۶۷	۰.۸۵۹۴	۲

برای بررسی نحوه عملکرد روش پیشنهادی در سیستم مذکور تحت اثر بار P₂، نمودارهای تغییر مکان درجات آزادی سیستم در حالت بدون کنترل به همراه کنترل با یک حسگر

به گونه‌ای که با افزایش تعداد عملگرها انرژی جنبشی سازه کاهش چشم‌گیری دارد.

جدول ۵- مقایسه بیشینه تغییرات انرژی جنبشی سازه

حالت پایش	بیشینه انرژی جنبشی
Control off	۵۴۸/۱۴
A ₅ -S ₄	۵۴
A _{5,4} -S ₄	۴۱/۱۹
A _{5,4,3} -S ₄	۵۶/۵۱
A _{5,4,3} -S _{4,3}	۲۹/۹۴
A _{5,4,3} -S _{4,3,5}	۱۵/۷۴
A _{5,4,3} -S _{4,3,5,2}	۱۲/۶۶

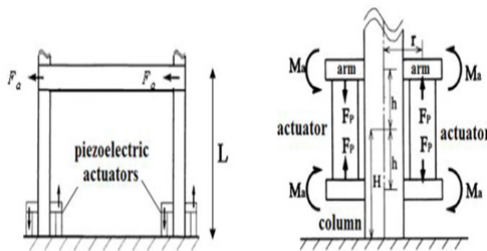
همچنین چگونگی تغییر بیشینه مجموع تغییر مکانهای نسبی طبقات سازه در بازه زمانی تحلیل دینامیکی در حالت‌های مختلف پایش متفاوت می‌باشد. جدول ۶ این تغییرات را بیان می‌کند. روشن است، کارایی روش پیشنهادی با افزایش تعداد عملگرها بیشتر می‌شود.

جدول ۶- بیشینه مجموع تغییر مکانهای نسبی طبقات

حالت پایش	بیشینه مجموع مقادیر Drift در طبقات
Control off	۲/۶۹
A ₅ -S ₄	۰/۹۱۲
A _{5,4} -S ₄	۰/۸۲۰
A _{5,4,3} -S ₄	۰/۹۹۳
A _{5,4,3} -S _{4,3}	۱/۱۱۸
A _{5,4,3} -S _{4,3,5}	۰/۷۷۷
A _{5,4,3} -S _{4,3,5,2}	۰/۸۵۲

برای بررسی اثر بار زلزله در شیوه نوین پیشنهادی، سازه ۵ طبقه شکل شماره یک را تحت زلزله السنترو قرار می‌دهیم. نیروی زلزله از طریق شتاب در لحظات مختلف که از شتابنگاشت زلزله السنترو توسط برنامه فراخوانی می‌گردد در الگوریتم وارد می‌شود. جدول شماره ۷ بیشینه مقدارهای تغییر مکان طبقات چهارم و پنجم را در حالت‌های مختلف پایش سازه تحت زلزله السنترو ارائه می‌کند.

توان بهره جست. اشکال زیر برخی از شیوه‌های استفاده از مواد پیزوالکتریک در کنترل فعال سازه‌های قابی را نشان می‌دهد. در شکل شماره ۳ عملگرهای پیزوالکتریک در دو طرف پایین ستونهای طبقه اول نصب گردیده است. بر اساس ولتاژ اعمال شده به عملگرها، لنگرهای متمرکز M_a به پایین ستونها اعمال می‌گردد.



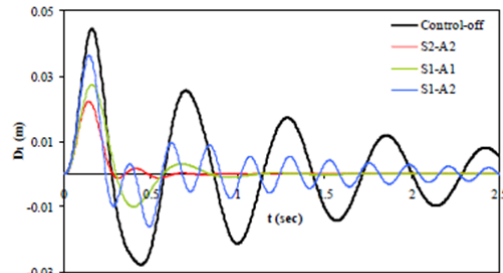
شکل ۵- موقعیت قرارگیری عملگرهای پیزوالکتریک در مدل کامادا و همکاران

در روابط فوق مقادیر F_a و F_p ، L به ترتیب ارتفاع ستون، نیروی تولید شده عملگر و نیروی برشی معادل تولید شده در طبقه اول می‌باشند. مطابق رابطه فوق اگر عملگر در نزدیکترین فاصله ممکن نسبت به پایه قاب نصب گردد بهترین نتیجه حاصل می‌گردد.

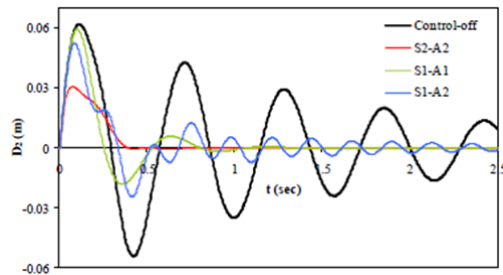
۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک شیوه نوین برای پایش فعال نوسانهای سازه ارائه گردید. این فرایند بر پایه نگره‌های دینامیک سازه‌ها رابطه سازی شد و در آن نوسانهای سازه با چند عملگر و حسگر پایش می‌شوند. در الگوی پیشنهادی، نیروهای عملگرها همانند نیروهای میرایی لزج پنداشته شدند و تلاش گردید نیروهای عملگرها به گونه‌ای محاسبه شوند که تعداد بیشتری از میرایی مودهای نوسان پایین سازه بحرانی شوند. برای بررسی روش پیشنهادی تغییرات بیشینه تغییر مکان، بیشینه انرژی جنبشی سیستم و بیشینه مجموع مقادیر تغییر مکان 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 در موقعیت مناسب تغییر مکان طبقه‌های بالایی تحت بار هارمونیک نسبت به

و یک عملگر در حالت‌های مختلف قرارگیری (شامل حالت بهینه) ترسیم می‌گردد.



شکل ۳- نمودار تغییر مکان - زمان برای درجه اول سیستم



شکل ۴- نمودار تغییر مکان - زمان برای درجه دوم سیستم

مقایسه نمودارهای بالا با نتایج حاصل از کنترل سازه دو درجه آزادی مورد نظر با استفاده از نرم افزار ANSYS نشان می‌دهد که زمان میرا شدن ارتعاشات طی استفاده از روش پیشنهادی (۰.۵ ثانیه) خیلی کمتر از حالت استفاده از روش نرم افزار ANSYS (۲ ثانیه) می‌باشد.

۷- کارایی روش از دیدگاه سخت افزاری

برای اجرایی نمودن الگوریتم پیشنهادی استفاده از ورق‌های PZT با توجه به سرعت عملکرد بالای آنها به عنوان عملگر می‌تواند مفید باشد. شکل زیر نحوه استفاده از ورقهای PZT در پایه ستونهای سازه فولادی را مطابق مدل Kamada نشان می‌دهد.

مطابق مطالعات کامادا^۱ و همکاران [۱۳] از مواد پیزوالکتریک در کنترل فعال ارتعاشات سازه‌های قابی نیز می

¹ Kamada

- ASCE Journal of Structural Engineering 127(9): 1054-1062.
- [4] Rudinger F (2007) Tuned mass damper with nonlinear viscous damping, Journal of Sound and Vibrations 300: 932-948.
- [5] Hoang N, Fujino Y, Warnitchai P (2008) Optimal tuned mass damper for seismic applications and practical design formulas. Engineering Structures 30: 707-715
- [6] Datta TK (2003) A state of the art review on active control of structures. 22nd ISET Annual Lecture, ISET Journal of Earthquake Technology 40(1): 1-17.
- [7] Symans M, Constantinou MC (1999) Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review. Engineering Structures 21: 469-487.
- [8] Korayem MH, Alipour A (2010) Dynamic analysis of moving cables with variable tension and variable speed. International Journal of Engineering 23(2): 157-168.
- [9] Alamatian J, Rezaeepazhand J (2011) A simple approach for determination of actuator and sensor locations in smart structures subjected to the dynamic loads. IJE Transactions A: Basics 24(4): 341-349.
- [10] Dukkupati RV (2010) Matlab An introduction and applications. New age publishers.
- [11] Clough RW, Penzien J (1993) Dynamics of Structures. McGraw Hill, New York.
- [12] Karagulle H, Malgaca L, Oktem, HF (2004) Analysis of active vibration control in smart structures by ANSYS. Smart Materials and Structures 13: 661-667.
- [13] Kamada T (1996) Active vibration control of frame structures with smart structure using piezoelectric actuator. 1st Report, Vibration Control by Control of ending Moment of the Columns 62-599C: 2577-2584.
- حالت بدون استفاده از سامانه پایش فعال حدود ۶۵ درصد کاهش می یابد. در حالی که در استفاده از دو عملگر و یک حسگر تغییر مکان طبقات بالایی حدودا ۷۲ درصد کاهش می یابد. همچنین استفاده از سه عملگر و دو حسگر در موقعیت های مناسب، بیشینه تغییر مکان طبقات بالایی را تا ۷۵ درصد کاهش می دهد. در خصوص بیشینه انرژی جنبشی سیستم، استفاده از یک عملگر و یک حسگر در موقعیت های مناسب، این مقدار را حدود ۹۰ درصد کاهش می دهد. بیشینه مجموع مقادیر تغییر مکان نسبی در طبقات نیز در هنگام استفاده از سه عملگر و سه حسگر حدود ۷۰ درصد کم می شود. همچنین در همه حالت های استفاده از دو یا سه عملگر با دو یا سه حسگر اثر گذارترین سامانه هنگامی به دست می آید که حسگرها در موقعیت متناظر با بیشترین (دو مقدار یا سه مقدار بیشتر) مقادیر ردیف اول وارون ماتریس شکل نوسان قرار گیرند.

مراجع

- [1] Akutagawa S, Otsuki M, Kitagawa Y (2004) Hybrid control system with optimal fuzzy logic and genetic algorithm for high-rise buildings. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada.
- [2] Guclu R, Yazici H (2008) Vibration control of a structure with ATMD against earthquake using fuzzy logic controllers. Journal of Sound and Vibrations 318: 36-49.
- [3] Chen G, Wu J (2001) Optimal placement of multiple tune mass dampers for seismic structures.