

کنترل ارتعاشی فعال سازه های هوشمند قابی در برابر زلزله

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

۱- دانشجوی دوره دکتری مهندسی عمران سازه، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد

alamatian@mshdiau.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۱۱/۱۴]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۲/۱۱]

چکیده- در این مقاله روش نوینی برای پایش فعال نوسان‌های سازه‌ها ارائه می‌شود. رابطه‌سازی این فرایند بر پایه اصول دینامیک سازه‌ها می‌باشد و در آن نوسانهای سازه با چندین عملگر پایش می‌شوند. در اینجا، نیروی هر عملگر به صورت نیروی معادل میرایی لزج پنداشته شده و تلاش می‌شود نیروهای عملگرها به گونه‌ای حساب شوند که تعداد بیشتری از میرایی موده‌های نوسان پایین سازه بحرانی شوند. با این کار، نیروهای عملگرها از یک فرایند ریاضی ساده به دست می‌آید. کارایی روش پیشنهادی با بررسی تغییرمکان در حالت‌های مختلف پایش فعال سازه پنج درجه آزادی بررسی می‌شود. نتایج عددی نشان می‌دهند، شیوه پایش فعال پیشنهادی عملکرد مناسبی در کاهش نوسان‌های سازه دارد. مطابق نتایج به دست آمده، بیشینه تغییرمکان طبقات بالایی با تعداد عملگر و حسگر مناسب، در سازه پنج درجه آزادی تا ۵۵ درصد کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: سازه هوشمند، پایش فعال، حسگر، عملگر، تغییرمکان، انرژی جنبشی.

۱- مقدمه

تحریک‌های خاصی که طراحی شده‌اند، به کار می‌روند. باید دانست در پایش غیرفعال سازه‌ها، انرژی از سامانه خارج می‌شود. میراگرهای جرمی (TMD) یک نمونه از سامانه‌های پایش غیرفعال است [۲-۵].

به دلیل محدودیت‌های اشاره شده، در دهه اخیر پیشگرهای فعال سازه برای مقابله با نیروی زلزله بسیار مورد توجه است. این سامانه‌ها پاسخ بهتری در برابر تحریک‌های مختلف دارند. کاربرد این سامانه‌ها از سال ۱۹۸۹ آغاز شد. باید دانست، پیچیدگی، حجم بالای محاسبات و عدم قطعیت عامل‌ها از کاستی‌های سامانه‌های فعال است. در این سامانه‌ها عملگرها به وسیله‌ی 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 شده‌اند [۶].

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 است 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]. به دلیل سادگی، هزینه کم و عدم نیاز به انرژی خارجی، سامانه‌های پایش غیرفعال سازه‌ها، دارای کاربردهای فراوانی است. 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

۲- مبانی و رابطه سازی روش پیشنهادی

معادله تعادل دینامیکی یک سازه را می توان با روش های مختلف مانند اصل همیلتون رابطه سازی کرد [۸]:

$$[M] \{\ddot{D}\} + [C] \{\dot{D}\} + [S] \{D\} = \{p(t)\} \quad (۱)$$

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

$$[M] \{\ddot{D}\} + [C] \{\dot{D}\} + [S] \{D\} + \{f^a\} = \{p(t)\} \quad (۲)$$

در اینجا، $\{f^a\}$ بردار نیروهای عملگرها است که به سازه وارد می شود. فرایند پایش هنگامی بهینه خواهد بود که بتواند نوسان های 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، نوسان های 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:

$$M_i \ddot{Z}_i + C_i \dot{Z}_i + S_i Z_i + \{\varphi_i\}^T \{f^a\} = \{\varphi_i\}^T P \{t\} \quad (۳)$$

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

در این رابطه M_i ، C_i و S_i به ترتیب مقادیر جرم، میرایی و سختی مختصه مودال Z_i است. 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 شود. در این حالت، مناسبترین شیوه پایشی در دسترس قرار می گیرد؛ زیرا بحرانی شدن میرایی n مود اول نوسان سازه بحرانی است؛ نوسانهای سامانه در کوتاه ترین زمان خواهد شد.

جدول (۱) الگوریتم های متداول پایش فعال سازه ها

Method	Main concept
Optimum Linear Control	Minimum performance index
Pole assessment	Minimum performance index
Independent modal space	Minimum modal force
Annie optimal control	Minimum functional
Bonded control	Response control
Nonlinear control	Minimum higher order functional
General feedback control	Dynamic response control
Sliding mode control	Sliding surface
Time delay control	Effect of time delay
Neural network control	Database rules
Genetic algorithm	Genetic algorithm

سامانه های نیمه فعال از سامانه های غیرفعال اصلاح شده برای تنظیم ویژگی های مکانیکی ناشی می شوند. ابزار اتلاف انرژی مکمل از این گونه سامانه ها است. ویژگی های مکانیکی این سامانه ها بر پایه بازخورد از پاسخ اندازه گیری شده و یا تحریک تنظیم می شوند. مانند سامانه های پایش فعال، در سامانه های نیمه فعال نیز پیشگر ضمن اندازه گیری بازخورد، فرمان هایی برای ابزار پایش نیمه فعال تولید می کند. همچنین، در سامانه های نیمه فعال، مانند سامانه های غیرفعال، نیروهای پایش به عنوان نتیجه ای از حرکت سازه است و بر اساس تنظیم مناسب ویژگی های مکانیکی سامانه پایش نیمه فعال به دست می آیند [۷].

در این مقاله، روش نوینی برای پایش فعال سازه ها ارائه می شود. این شیوه بر مبنای استفاده از چندین عملگر و حسگر است. در این راه، از نگره های دینامیک سازه ها استفاده می شود و نیروهای عملگرها به صورت میرایی به معادله های تعادل دینامیکی سازه افزوده می شوند، به گونه ای که تعداد بیشتری از مودهای پایین در وضعیت بحرانی قرار گیرند. بر پایه این فرایند می توان موقعیت حسگرها و عملگرها و نیروی مناسب عملگرها را برای پایش نوسان های سازه تعیین کرد. کارایی روش پایش پیشنهادی با حل نمونه های عددی ارزیابی می شود.

در این رابطه، ω_i ، i امین فرکانس طبیعی سازه است. در حالت استفاده از n عملگر n معادله از رابطه (۷) در دسترس قرار می-گیرد که با حل این دستگاه n معادله و n مجهول مقادارهای نیروهای n عملگر به دست می-آیند. همچنین \dot{Z}_i سرعت مختصه مودی i ام است که به موقعیت نصب حسگرها وابسته است. چگونگی تعیین این کمیت در بخش بعدی ارائه می-شود. باید دانست، نیروهای عملگرها از حل دستگاه n معادله n مجهول (رابطه ۷) به دست می-آیند. بر این اساس، نیروهای عملگرها در هر لحظه تغییر می-کنند و مقدار آنها به وسیله سامانه پایش فعال و از حل دستگاه معادله‌های (۷) در دسترس قرار می-گیرند. برای راستی‌آزمایی روش پایش فعال نوین پیشنهادی از تحلیل‌های دینامیکی عددی استفاده می-شود. این کار با تحلیل دینامیکی عددی سامانه پایش شده انجام می-پذیرد. در این شیوه، بازه زمانی تحلیل به تعداد محدودی گام زمانی کوچک تقسیم می-شود و در هر گام زمانی از فرایندهای تابع اولیه‌گیری زمانی برای دستیابی به پاسخ سازه بهره‌جویی می-شود. در این مقاله، روش نیومارک با شتاب خطی به کار می-رود. گامهای تحلیل دینامیکی عددی سامانه پایش شده به صورت زیر است.

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 سرعت های 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. بردار شتاب گام زمانی n ام را با حل دستگاه خطی رابطه زیر به دست آورید:

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

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.

پیش از این علامت‌ها و رضائی پزند از این اصل استفاده کرده‌اند 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 کردند. این فرایند دارای محدودیت‌هایی است که از آن جمله می‌توان به در نظر گرفتن تنها یک عملگر در سازه اشاره کرد. این موضوع سبب کاهش کارایی در سازه‌های با درجه‌های آزادی زیاد می‌شود. در این مقاله، این کاستی برطرف می‌شود. 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 رابطه‌سازی کلی ارائه می‌شود؛ به گونه‌ای که طراح می‌تواند 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 می‌شود. همچنین، برای تعیین موقعیت عملگرها، n درایه بزرگ مود اول انتخاب می‌شود؛ 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 زیر خواهد بود:

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

$$\{\varphi_i\}^T P \{t\} \quad i=1,2,\dots,n$$

در رابطه بالا، $f_k^a, f_j^a, f_r^a, \dots, f_1^a$ نیروهای n عملگر است. همچنین، $\varphi_{ki}, \varphi_{ji}, \dots, \varphi_{ri}$ به ترتیب، n درایه بزرگ شکل مود نوسان i ام هستند که n عملگر به درجه‌های آزادی متناظر آنها متصل شده-اند. اکنون، جمله‌های وابسته به نیروهای عملگر به صورت الگوی میرایی لزج فرض می‌شود. در نتیجه می‌توان نوشت:

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

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

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

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

روشن است، کوتاهترین زمان از بین رفتن نوسان‌ها در شرایطی ایجاد می‌شود که میرایی‌های رابطه (۶) بحرانی شود. یعنی:

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

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

شیوه تعیین موقعیت حسگرها (گام ۳) و نیز فرایند محاسبه سرعت های مودی (گام ۴)، در قسمت های بعدی مقاله ارائه می شود. در ادامه، به ارزیابی تحلیلی شیوه پایش پیشنهادی پرداخته می شود.

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 است:

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

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 شوند. 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) به صورت 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 است 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 وجود این، محدودیت های اجرایی سبب می شود 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 است. با توجه به (رابطه ۱۸) می توان دریافت حسگرها باید در درجه های آزادی نصب شوند که درایه های متناظر این درجه های 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 می شود. استفاده از دو حسگر سبب می شود آنها را در درجه های آزادی متناظر با بزرگترین و پیش

۳- ارزیابی تحلیلی شیوه پایش پیشنهادی

برای ارزیابی فرایند پیشنهادی، حالت های استفاده از یک، دو و سه عملگر بررسی می شوند. چنانچه در روش پیشنهادی تنها یک عملگر در سازه وجود داشته باشد، آنگاه نیروی عملگر از رابطه زیر به دست می آید:

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

این رابطه با نتیجه ارائه شده به وسیله پژوهشگران پیشین سازگار است [۹]. بنابراین شیوه پیشنهادی بسیار کلی تر از شیوه های موجود است. چنانچه پایش نوسان های سازه با دو عملگر انجام پذیرد، (رابطه ۷) به دستگاه دو معادله دو مجهول زیر منجر می شود:

$$C_1^* = C_1 + \left(\frac{\varphi_{k1}}{\dot{Z}_1}\right) f_k^a + \left(\frac{\varphi_{j1}}{\dot{Z}_1}\right) f_j^a \quad (10)$$

$$C_2^* = C_2 + \left(\frac{\varphi_{k2}}{\dot{Z}_2}\right) f_k^a + \left(\frac{\varphi_{j2}}{\dot{Z}_2}\right) f_j^a \quad (11)$$

در اینجا φ_{k1} و φ_{j1} به ترتیب بزرگترین و پیش بزرگترین درایه های نخستین بردار شکل نوسان و φ_{k2} و φ_{j2} نیز به ترتیب بزرگترین و پیش بزرگترین درایه های دومین بردار شکل نوسان است. با حل این دستگاه، نیروهای دو عملگر به صورت زیر به دست می آیند:

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

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

به گونه مشابه، استفاده از سه عملگر در پایش نوسان های سازه به دستگاه سه معادله، سه مجهول زیر منجر می شود:

$$C_1^* = C_1 + \left(\frac{\varphi_{k1}}{\dot{Z}_1}\right) f_k^a + \left(\frac{\varphi_{j1}}{\dot{Z}_1}\right) f_j^a + \left(\frac{\varphi_{l1}}{\dot{Z}_1}\right) f_l^a \quad (14)$$

$$C_2^* = C_2 + \left(\frac{\varphi_{k2}}{\dot{Z}_2}\right) f_k^a + \left(\frac{\varphi_{j2}}{\dot{Z}_2}\right) f_j^a + \left(\frac{\varphi_{l2}}{\dot{Z}_2}\right) f_l^a \quad (15)$$

$$C_3^* = C_3 + \left(\frac{\varphi_{k3}}{\dot{Z}_3}\right) f_k^a + \left(\frac{\varphi_{j3}}{\dot{Z}_3}\right) f_j^a + \left(\frac{\varphi_{l3}}{\dot{Z}_3}\right) f_l^a \quad (16)$$

آزادی برای نصب عملگرها و حسگرها تعیین شود. این کار با توجه به درایه‌های نخستین بردار شکل نوسان و نخستین سطر از وارون ماتریس شکل نوسان انجام می‌پذیرد. اولویت‌های نصب حسگرها و عملگرها در (جدول ۲) مشخص شده‌اند. این کار با استفاده از اصول بخش‌های پیشین انجام می‌پذیرد. 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. در ارزیابی عددی روش پیشنهادی بیشینه تغییر مکان طبقات چهارم و پنجم در حالت‌های مختلف پایش فعال سازه در نظر گرفته می‌شود. (جدول ۴) بیشینه مقدارهای تغییر مکان را در حالت‌های مختلف پایش ارائه می‌کند.

جدول (۲) اولویت‌های نصب حسگرها و عملگرها

Degree of Freedom	φ_{k1}	φ_{1L}^{inv}	Priority of actuator	Priority of sensor
1	0.1565	0.1922	5	5
2	0.2991	0.3673	4	4
3	0.4541	0.5576	3	2
4	0.5555	0.6821	2	1
5	0.6093	0.3741	1	3

Table (2) Install priority of sensors and actuators

جدول (۳) حالت‌های مختلف پایش فعال سازه پنج طبقه

Symbol	Case
Control off	Main structure
A ₅ -S ₄	One sensor (4 th story) and one actuator (5 th story)
A _{5,4} -S _{4,3}	Two sensors and two actuators
A _{5,4,3} -S ₄	One sensor and three actuators
A _{5,4,3} -S _{4,3}	Two sensors and three actuators

Table (3) Different active control cases in five-story building

جدول (۴) مقایسه بیشینه تغییر مکان طبقات بر پایه الگوریتم پیشنهادی (cm)

Case	4 th story	5 th story
Control off	12	13.3
A5-S4	6.99	7.66
A5,4-S4,3	6.3	7
A5,4,3-S4	7	7.6
A5,4,3-S4,3	5.36	7.99

Table (4) Comparison the maximum displacement based on the proposed method (cm)

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 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 درجه‌های آزادی L و M به ترتیب، دارای بزرگترین و پیش بزرگترین درایه‌ها در نخستین سطر وارون ماتریس شکل نوسان است. 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 پنج طبقه که تحت زلزله السترو قرار می‌گیرد، انجام می‌پذیرد [۹]. مشخصات سختی و جرم‌های این سازه در (شکل ۱) نشان داده شده است.

شکل ۱ ساختمان ۵ طبقه برشی [۱۱]

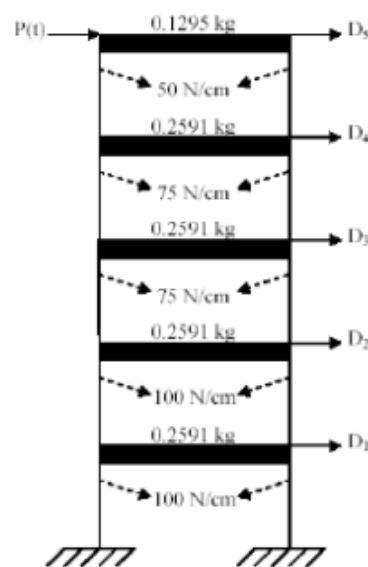


Fig. 1 Five story shear building [11]

همچنین، این سازه دارای ۵٪ میرایی در مود اول است، و دیگر موده‌های 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 راه، اثر تعداد حسگرها و عملگرها در کارایی شیوه پیشنهادی بررسی می‌شود. نخست، لازم است مناسب‌ترین درجه‌های

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 Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, 2004.
- [2] Guclu R, Yazici H. Vibration control of a structure with ATMD against earthquake using fuzzy logic controllers. *Journal of Sound and Vibrations* 2008; 318: 36-49.
- [3] Chen G, Wu J. Optimal placement of multiple tune mass dampers for seismic structures. *ASCE Journal of Structural Engineering* 2001; 127(9): 1054-1062.
- [4] Rudinger F. Tuned mass damper with nonlinear viscous damping. *Journal of 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. *Engineering Structures* 2008; 30: 707-715
- [6] Datta TK. A state of the art review on active control of structures. 22nd ISET Annual Lecture, ISET Journal of Earthquake Technology 2003; 40(430): 1-17
- [7] Symans MD, Constantinou MC. Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review. *Engineering Structures* 1999; 21: 469-487
- [8] Korayem MH, Alipour A. Dynamic analysis of moving cables with variable tension and variable speed. *International Journal of Engineering* 2010; 23(2): 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. *IJE Transactions A: Basics* 2011; 24(4): 341-349
- [10] Dukkipati RV. *Matlab An introduction and applications*. New age publishers 2010.
- [11] Clough RW, Penzien J. *Dynamics of Structures*. McGraw Hill, New York 1993.

بر اساس نتایج (جدول ۴)، در حالت استفاده از یک حسگر و یک عملگر، تغییر مکان طبقات بالایی حدود ۴۲ درصد کاهش می یابد. همچنین، در حالت استفاده از دو عملگر و دو حسگر تغییر مکان طبقات بالایی حدود ۴۷ درصد کاهش می یابد. همچنین، در صورت استفاده از سه عملگر و تنها یک حسگر افزایش تعداد عملگرها نسبت به حالت استفاده از دو عملگر (به همراه یک دو حسگر)، نتیجه مثبتی در زمینه کاهش بیشینه تغییر مکانها نخواهد داشت. در صورت استفاده از سه عملگر و دو حسگر بیشینه تغییر مکان طبقات بالایی را تا ۵۵ درصد کاهش می دهد.

۶-نتیجه گیری

در این پژوهش، یک شیوه نوین برای پایش فعال نوسانهای سازه ارائه گردید. این فرایند بر پایه نگره های دینامیک سازه ها رابطه سازی شد و در آن نوسانهای سازه با چند عملگر و حسگر پایش می شوند. در الگوی پیشنهادی، نیروهای عملگرها همانند نیروهای میرایی لزج پنداشته شدند و تلاش گردید نیروهای عملگرها به گونه ای محاسبه شوند که تعداد بیشتری از میرایی مودهای نوسان پایین سازه بحرانی شوند. برای بررسی روش پیشنهادی تغییرات بیشینه تغییر مکان در طبقات در حالت های مختلف پایش فعال سازه پنج درجه آزادی بررسی شد. بر اساس نتایج عددی، در حالت استفاده از یک حسگر و عملگر در موقعیت مناسب تغییر مکان طبقه های بالایی نسبت به حالت بدون استفاده از سامانه پایش فعال حدود ۴۲ درصد کاهش می یابد. در حالی که در استفاده از دو عملگر و دو حسگر، تغییر مکان طبقات بالایی حدود ۴۷ درصد کاهش می یابد. همچنین، استفاده از سه عملگر و دو حسگر در موقعیت های مناسب، بیشینه تغییر مکان طبقات بالایی را تا ۵۵ درصد کاهش می دهد.

Active Vibration Control of Frame Smart Structures

B. Karimpoor¹, A. Kayhani², J. Alamatian^{3*}

1- Ph.D. Student, Civil Eng. Dept., Shahrood Univ., Shahrood, Iran

2- Assistant Prof., Civil Eng. Dept., Shahrood Univ., Shahrood, Iran

3- Assistant Prof., Civil Eng. Dept., Mashhad Branch. Islamic Azad Univ., Mashhad, Iran

alamatian@mshdiau.ac.ir

Abstract:

In this paper, a new scheme is presented for controlling the structural vibrations, excited by the external dynamic effects such as the earthquake and etc. The proposed method is an active control technique which is compatible with the structural dynamic behavior. In the other words, the proposed active control method is formulated based on the structural dynamics theories. This approach could be used for designing a control mechanism with multi actuators and multi sensors. For this purpose, the actuator's forces vector is added to the dynamic equilibrium equations of the motion. The vector of the actuator's forces is independent of the natural dynamic equilibrium equations of system and the elements of this vector are determined based on the active control strategy. This paper presents an innovate concept to formulate the external control forces which are applied to the main structure by the actuators. For calculating the control forces, each actuator force is modeled as an equivalent viscous damper. If there is m actuator attached to the structure, m actuator force should be determined in the control process. Based on the proposed technique, each actuator force is considered as a viscous force, added to the dynamic equations of motion. Therefore, there is m unknown force in the control system. These m unknown parameters should be calculated at each instant time of the control process which leads to reduce the structural vibration. For determining these m unknown actuator forces, m additional equations is required. Here, the critical damping concept of the structural dynamics theory is utilized to prepare the required equations. For this purpose, the actuator forces are determined so that several lower vibration modes are damped critically. In the other words, m actuator force is calculated if the m initial vibration's modes are in the critical conditions. By creating critical damping condition for m initial vibration's mode, a set of m simultaneous equations is achieved. In each time instance of the control process, the m actuator forces are determined by solving this set of simultaneous equations. As a result, the proposed control mechanism is formulated by a simple mathematical formulation. On the other hand, the proposed method does not depend on the type of the dynamic load and it could be applied to control each structure with multi degrees of freedom. It should be noted that running these process in the case of multi actuator is the main originality of this paper. In the other words, a similar control procedure is performed for a system with single actuator. For numerical verification of the proposed method, some criterions such as the maximum displacement are evaluated in a five-story shear building which is excited by the seismic load i.e. the Elcentro Earthquake. This study shows that the proposed active control method has sufficient accuracy and suitable efficiency for decreasing the structural vibrations. According to the numerical results, the maximum drift in the upper floor of this five-story shear building is reduced by 55%. By increasing the number of actuators, the control process with higher efficiency is achieved.

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