مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۸، شماره‌ی ۱، ص. ۶۷-۸۰

کنترل فعال متمرکز و نامتمرکز مدل‌های سازه‌ی سه‌بعدی با بازخورد جابه‌جایی و سرعت

مهران فدوی (دانشجوی دکتری)
دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

فیاض رحیم‌زاده رفویی* (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

سهیل منجمی‌نژاد (استادیار)
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

به‌کارگیری سیستم‌های کنترل برای محدودساختن ارتعاشات سازه‌یی به‌صورت فعال و غیرفعال در چند دهه‌ی اخیر مطرح شده و برخی از آن‌ها نیز کاربردی شده‌اند. در این نوشتار ضمن بررسی روش‌های ارائه‌شده برای کنترل متمرکز سازه‌های بلند، نسبت به تشریح مفهوم کنترل نامتمرکز و تعمیم کاربرد این ایده به مدل‌های سازه‌یی سه‌بعدی اقدام می‌شود. برای این منظور ضمن ارائه‌ی ایده‌ی تقسیم یک مدل سازه سه‌بعدی به تعدادی زیرسازه، از یک الگوریتم کنترل با بازخورد سرعت و جابه‌جایی برای کاهش پاسخ زیرسیستم‌ها استفاده می‌شود. در شاخص کارآیی درنظرگرفته شده برای تعیین الگوریتم، ضرایب وزنی با بهره‌گیری از معادله‌ی لیاپانوف تعیین شده تا پایداری سیستم دینامیکی تضمین شود. سپس با طرح یک مطالعه‌ی موردی نسبت به بررسی عملکرد کنترل نامتمرکز سازه‌ها با روش مرسوم کنترل متمرکز اقدام شد. مطالعه‌ی پارامتریک گسترده‌یی برای تعیین حساسیت الگوریتم کنترل پیشنهادی به پارامترهایی چون تعداد و اندازه‌ی زیرسازه‌ها، اثر خروج از مرکزیت با استفاده از یک رکورد زلزله انجام گردید؛ نتایج حاصله نشان می‌دهد که در تمامی حالت‌ها، کنترل غیر متمرکز پیشنهادی ضمن تضمین پایداری سازه، دارای کارآیی تقریباً یکسانی با حالت کنترل متمرکز می‌باشد. تمامی مطالعات انجام‌شده در محدوده‌ی رفتار خطی سازه‌ها بوده و از نرم‌افزار Matlab برای انجام تحلیل‌ها استفاده شده است.

mehranfadavi@yahoo.com
rofooei@sharif.edu
smonajemi@yahoo.com

واژگان کلیدی: سازه‌های بلند، کنترل متمرکز، کنترل نامتمرکز، کنترل فعال.

۱. مقدمه

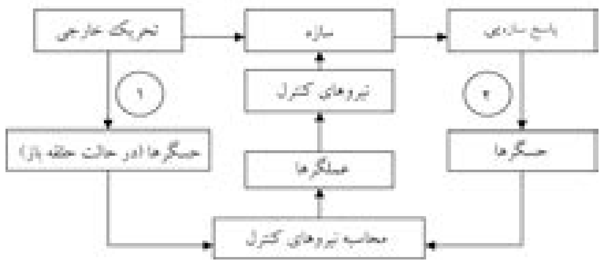
یکی از شیوه‌های کاهش پاسخ سازه‌ها، خصوصاً سازه‌های بلند، استفاده از روش «کنترل فعال» است. به‌طور ساده، در این روش از الگوریتمی برای تعیین نیروهای کنترل و از مجموعه‌یی از ابزارهای اِعمال نیرو در برخی یا تمامی طبقات سازه، و یا حتی در مواقعی صرفاً در تراز پایه استفاده می‌شود. سیستم‌های کنترل و الگوریتم‌های مورد استفاده در آن‌ها از مدت‌ها قبل در مهندسی برق، کنترل، مکانیک و هوافضا مورد استفاده قرار گرفته است. در مهندسی عمران ایده‌ی استفاده از کنترل فعال به‌منظور «کنترل ارتعاشات در سازه‌ها» نخستین‌بار در سال ۱۹۷۲ مطرح شد.[۱] پس از آن محققین مختلفی این ایده را در زمینه‌های مختلف گسترش داده‌اند.[۲-۶] در این رابطه از الگوریتم‌های گوناگونِ ارائه‌شده به‌منظور تأمین اهداف کنترلی متفاوت ــ نظیر کنترل کلاسیک بهینه[۱]، کنترل بهینه‌ی لحظه‌یی[۲]، جایابی قطبی[۳]، کنترل فضای مودی مستقل (IMSC)، پالس کنترل و الگوریتم‌های مقاوم (مانند H_2، H_∞) کنترل مود لغزش[۴] و غیره ــ می‌توان نام برد، که در چند سال اخیر توجه زیادی به آن‌ها شده است. در شکل ۱ شمایی از اجزای تشکیل‌دهنده‌ی یک سیستم کنترل فعال نشان داده شده است.

در سیستم‌های بزرگ و حجیم، از آنجا که انتقال اطلاعات از حس‌گرها و دریافت آن‌ها توسط سیستم‌های کنترل‌کننده باید به‌سرعت انجام شود، ریزکردن سیستم برای کنترل سازه ــ آن هم به‌صورت محلی و کوچک‌تر ــ ضرورت می‌یابد. در یک مجتمع بزرگ مسکونی، یک واحد گسترده‌ی پتروشیمی و... حضور یک واحد کنترل مرکزی برای کل سازه، علاوه بر انتقال اطلاعات درصورت ایجاد هرگونه نقص در این واحد، کل سیستم آسیب‌پذیر می‌شود. در این‌گونه سیستم‌ها، راه حل پذیرفته شده عبارت است از به‌کارگیری الگوریتم‌های کنترلیِ مستقل و نامتمرکزی[۵] که روی هر بخش به‌صورت جداگانه عمل کند؛ به‌این ترتیب، هر سیستم به چند زیرسیستم تقسیم می‌شود.

---

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۱۰/۲۰، اصلاحیه ۱۳۸۹/۵/۱۸، پذیرش ۱۳۸۹/۱۰/۲۶.



شکل ۱. اجزای تشکیل دهنده‌ی یک سیستم کنترل در حالت کنترل متمرکز.[۴]

باید توجه داشت که نامتمرکزشدن کنترل، علی‌رغم احتمال ایجاد کاهش در کارآیی سیستم قابلیت اعتماد آن‌را از نظر پایداری افزایش داده و در صورت ازکار افتادنِ سیستم کنترلیِ یکی از زیرسیستم‌ها، کنترل سازه دچار آسیب کلی نخواهد شد. عامل تأخیر زمانی[۶] نیز در این حالت می‌تواند کمینه شود. در این نوع کنترل عموماً سعی می‌شود با بهره‌گیری از بازخوردِ اطلاعات محلی برای تعیین فرمان‌های کنترلی، کنترل هر بخش از سیستم به‌صورت جدا انجام شود. در شکل ۲ اجزای یک سیستم کنترل فعال نامتمرکز با m زیرسیستم نشان داده شده است. شیوه‌ی تقسیم یک سیستم به چند زیرسیستم، به تعداد درجات آزادی و میزان گستردگی فیزیکی آن بستگی خواهد داشت. کنترل غیرمتمرکز در آغاز درمورد سیستم‌های قدرت کاربرد داشت و بعدها توسط محققین دیگری گسترش یافت.[۷و۸] در این نوع کنترل مسئله‌ی پایداری سیستم مطالعه، و شرط لازم و کافی برای پایداریِ سیستم کنترل تحت قوانین کنترلی با بازخورد محلی و جبران‌سازی دینامیکی بیان شد.[۹] همچنین از روش مود لغزشی برای کنترل نامتمرکز سیستم‌های بزرگ‌مقیاس، تحت اثر ورودی خارجی و با وجود عامل تأخیر زمانی در متغیرهای حالت مورد استفاده قرارگرفت.[۱۰] طرح کنترلی آن‌ها شامل یک قانون کنترلی نامتمرکز و یک اَبَرصفحه‌ی سوئیچینگ[۷] از نوع انتگرالی است. آنان قانون کنترل نامتمرکز را به‌گونه‌یی تعیین کردند تا ضابطه کلی رسیدن[۸] برقرار شود.

در این نوع کنترل (مود لغزشی)، از کنترل تطبیقی مرجع[۹] برای تعیین قانون کنترلی نامتمرکز استفاده شده[۱۱] و همچنین چندین روش نامتمرکز برای سازه‌های خرپایی ارائه شد[۱۲] وکاربرد کنترل نامتمرکز در سازه‌های فضاکار انعطاف‌پذیر (خرپای سه‌بعدی) بررسی شد.[۱۳]

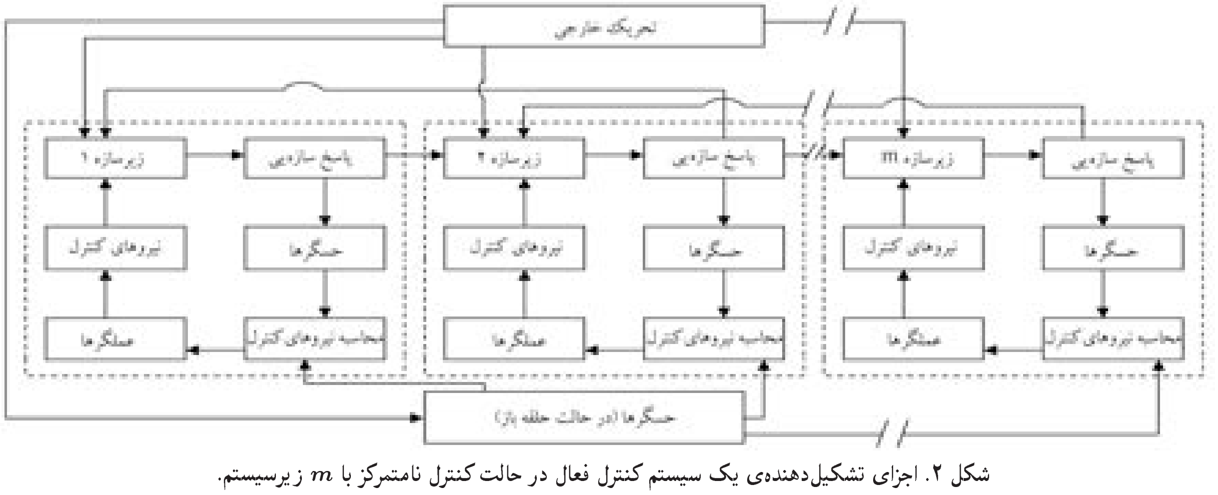
اما در سال ۱۹۹۶، محققین دیگری کنترل یک سازه ساختمانی چند درجه آزادی، مانند یک ساختمان بلندمرتبه، را با بهره‌گیری از کنترل نامتمرکزِ تطبیقی ساده‌مورد بررسی قرار دادند.[۱۴] رفوئی و منجمی‌نژاد نسبت به کنترل نامتمرکز تعدادی مدل‌دو بعدی از سازه‌های بلند با بهره‌گیری از کنترل بهینه لحظه‌یی اقدام کردند.[۱۵] برای این کار ابتدا ضرورت استفاده از کنترل نامتمرکز بررسی[۵] شد، و سپس با طراحی کنترل‌کننده‌ها و ماتریس بهره[۱۰]ی مناسب دو حالت کنترل ــ یکی با بهره‌گیری از بازخورد سرعت و دیگری کنترل با بهره‌گیری از بازخورد سرعت و جابه‌جایی ــ را مورد بررسی قرار دادند.

منجمی‌نژاد و رفوئی درخصوص کنترل نامتمرکز مقاوم سازه‌های بلند، از یک الگوریتم مود لغزشی[۱۱] بهره گرفتند.[۱۶] مراحل طراحی الگوریتم کنترل در روش مود لغزشی شامل دو مرحله است: ۱. طراحی سطوح لغزش؛ ۲. طراحی ضابطه[۱۲]. کنترل نامتمرکز ممکن است در دو حالت با یا بدون درنظر داشتن تأثیرات درجات آزادی مشترک بین زیرسیستم‌ها طراحی شود که البته در صورت درنظر داشتن تأثیرات درجات آزادی مشترک، اطمینان بیشتری به پایداری هر زیرسیستم و نیز کل سیستم کنترل وجود خواهد داشت.

در این مطالعه، کنترل متمرکز و نامتمرکز مدل‌های سه‌بعدی سازه‌های بلند با درنظر داشتن درجات آزادی مشترک بین زیرسازه‌ها و اثرات دوگانه‌ی آن‌ها بر یکدیگر بررسی شده است. الگوریتم مورد استفاده، کنترل بهینه‌ی لحظه‌یی[۱۳] است که در آن از بازخورد سرعت و بازخورد سرعت و جابه‌جایی برای محاسبه‌ی نیروهای کنترل استفاده شده است. مدل‌های سازه‌یی درنظر گرفته شده از نوع برشی، و پلان آن‌ها ــ که در تمام طبقات یکسان است ــ دارای خروج از مرکزیت e_y و e_x است. همانند رویه‌ی مورد استفاده درکنترل غیر متمرکز مدل‌های دوبعدی سازه‌ها، روش تفکیک زیرسازه‌ها براساس تعداد درجات آزادی انجام شده است. در ادامه، ضمن انجام یک مطالعه‌ی موردی نسبت به عملکرد کنترل نامتمرکز در کاهش پاسخ لرزه‌یی مدل‌های سازه‌یی و مقایسه‌ی آن با حالت کنترل متمرکز اقدام می‌شود. اثر ناشی از تأخیر زمانی در این مطالعه نادیده گرفته شده است.

۲. فرمول‌بندی معادلات حرکت در حالت کنترل غیرمتمرکز

یک سازه‌ی بلند برشی با جرم‌های متمرکز در n طبقه با $3n$ درجه آزادی (هر طبقه دو درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی دورانی) مطابق شکل ۳ در نظر گرفته



شکل ۲. اجزای تشکیل‌دهنده‌ی یک سیستم کنترل فعال در حالت کنترل نامتمرکز با m زیرسیستم.

شده و تحت اثر مؤلفه‌های افقی شتاب حرکت زمین $\ddot{U}_g$ قرار داده می‌شود. اگر $\bar{X}$ بردار جابه‌جایی نسبی طبقات مختلف سازه نسبت به تکیه‌گاه باشد، معادله‌ی حرکت سیستم به شکل ماتریسی ۱ نوشته می‌شود:

$$M\ddot{\overline{X}} + C\dot{\overline{X}} + K\overline{X} = -M[r]\ddot{U}_g + HU \qquad (1)$$

که در آن بردار تغییر مکان نسبی طبقات مختلف سازه چنین تعریف می‌شود:

$$\overline{X}^T = \{x_1\ y_1\ \theta_1 | x_2\ y_2\ \theta_2 | ... x_n\ y_n\ \theta_n\}_{1\times 3n} \qquad (2)$$

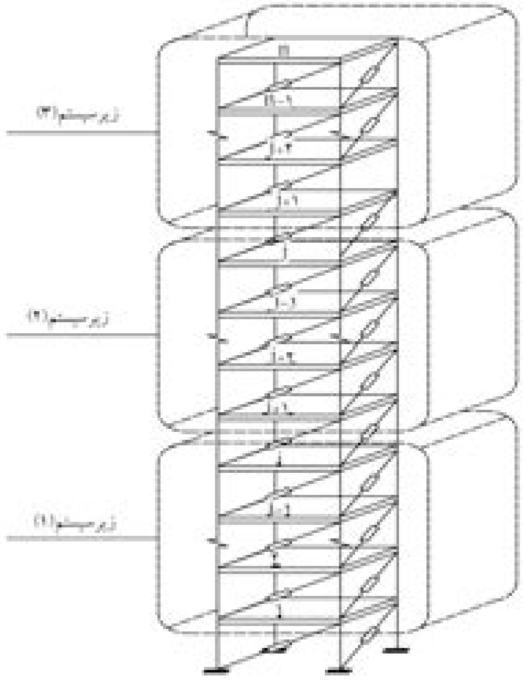
همچنین بردار نیروهای کنترل عبارت خواهد بود از:

$$U^T = \{u_{1x}, u_{1y}, u_{1\theta}|, ..., u_{ax}, u_{ay}, u_{a\theta}\}_{1\times 3a} \qquad (3)$$

در روابط فوق n تعداد طبقات ساختمان و $3a$ تعداد کنترل کننده‌هاست (در هر طبقه سه کنترل‌کننده در نظر گرفته شده است). ماتریس جرم سیستم‌سازه‌یی عبارت خواهد بود از:

$$M_{3n\times 3n} = \begin{bmatrix} M^1 & & & 0 \\ & M^2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & M^n \end{bmatrix},$$

$$M^i_{3\times 3} = \begin{bmatrix} m_i & 0 & 0 \\ 0 & m_i & 0 \\ 0 & 0 & m_i\bar{r}_i^2 \end{bmatrix} \qquad (4)$$



شکل ۳. مدل **3D** سازه‌یی یک ساختمان چند طبقه.

که در آن m_i جرم، $I_i = m_i\bar{r}_i^2$ لنگر ماند و $\bar{r}_i$ شعاع ژیراسیونِ طبقه‌ی iام است. همچنین ماتریس سختی این مدل سازه‌یی عبارت خواهد بود از:

$$[K]_{3n*3n} = \begin{bmatrix} K^1 + K^2 & -K^2 & & 0 \\ & K^2 + K^3 & -K^3 & \\ & & \cdots & -K^n \\ (Sym) & & & K^n \end{bmatrix},$$

$$[K^i]_{3*3} = \begin{bmatrix} K_{xi} & 0 & (-e_{yi}K_{xi}) \\ 0 & K_{yi} & (e_{xi}K_{yi}) \\ (-e_{yi}K_{xi}) & (e_{xi}K_{yi}) & (K_{\theta i} + e_{xi}^2 K_{yi} + e_{yi}^2 K_{xi}) \end{bmatrix} \qquad (5)$$

$$K_{xi} = \sum_{j=1}^{l} K_{xij}, \quad K_{yi} = \sum_{j=1}^{l} K_{yij}, \quad e_{xi} = \frac{\sum_{j=1}^{l} K_{yij} d_{xij}}{\sum_{j=1}^{l} K_{yij}},$$

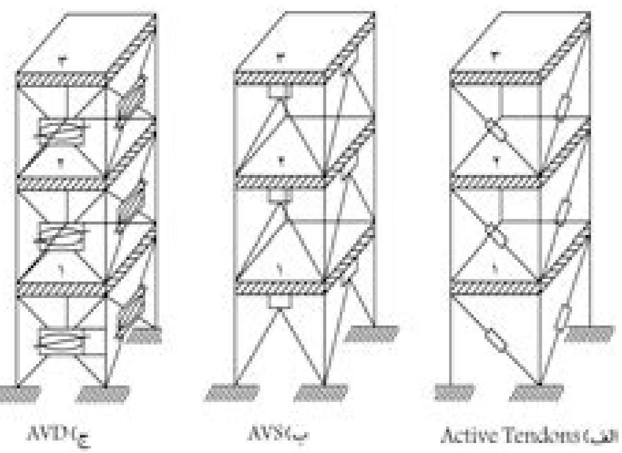
$$e_{yi} = \frac{\sum_{j=1}^{l} K_{xij} d_{yij}}{\sum_{j=1}^{l} K_{xij}}, \quad K_{\theta i} = \sum_{j=1}^{l} (K_{xij} d_{yij}^2 + K_{yij} d_{xij}^2) \qquad (6)$$

l تعداد ستون‌ها در یک طبقه، d_{xij} فاصله‌ی ستون j در طبقه‌ی i از محور مختصات در جهت x و d_{yij} فاصله‌ی ستون j در طبقه‌ی i از محور مختصات در جهت y است. ماتریس ضرایب تأثیر و بردار شتاب زمین چنین تعریف می‌شوند:

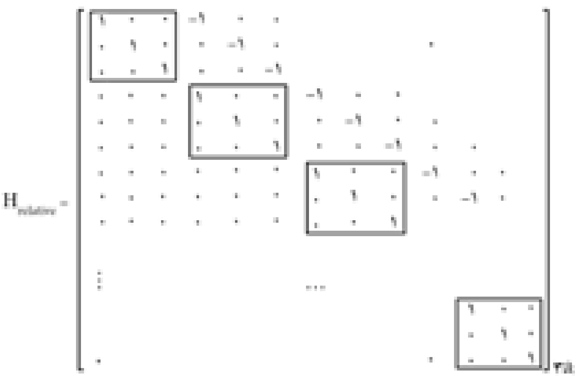
$$[r] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{3n\times 3}, \quad \ddot{U}_g = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{xg} \\ \ddot{u}_{yg} \\ \ddot{u}_{\theta g} \end{Bmatrix}_{3\times 1} \qquad (7)$$

به‌طورکلی ماتریس میرایی از نظر ظاهری شبیه ماتریس سختی است، با این تفاوت که ثابت‌های میرایی C_{xi}، C_{yi} و $C_{\theta i}$ جایگزین مقادیر K_{xi}، K_{yi} و $K_{\theta i}$ می‌شوند. ابعاد ماتریس H وابسته به نوع سازوکارکنترلی است که برای اعمال نیرو به سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماتریس H تعریف‌شده با فرض به‌کارگیری سیستم کابل‌های فعال[14] در طبقات مختلف بوده و درصورت استفاده از کنترل‌کننده‌هایی همچون سختی متغیر فعال (AVS)[15]، میراگر لزج فعال (AVD)[16] و غیره لازم است ماتریس H به‌نحو مناسبی اصلاح شود. شکل ۴ شیوه‌ی به‌کارگیری این سازوکارها را نشان می‌دهد.

با فرض استفاده از سیستم کابل‌های فعال، ماتریس موقعیت کنترل‌کننده‌ها چنین خواهد بود:



شکل ۴. سازوکارهای اعمال نیرو به سازه.



(۸)

در سیستم‌های کنترلی از نوع کابل‌های فعال، از کابل‌های پیش‌تنیده با میزان تنیدگی قابل تنظیم استفاده می‌شود. سیستم کنترلی AVS با تنظیم سختی طبقات، و سیستم AVD با افزایش میرایی سیستم نسبت به کاهش پاسخ سیستم دینامیکی وارد عمل می‌شود. در فضای حالت با تعریف بردار حالت به‌صورت $X^T = <\overline{x}, \dot{\overline{x}}>$، معادله‌ی سیستم تبدیل می‌شود به (در روابط از مختصات نسبی استفاده می‌شود):

$$\dot{X} = AX + BU + E\ddot{U}_g \tag{۹}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{6n\times 6n}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}H \end{bmatrix}_{6n\times 3a},$$

$$E = \begin{bmatrix} [o] \\ -[r] \end{bmatrix}_{6n\times 3}$$

$$[r]_{3n\times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ . & & . \\ . & & . \\ . & . & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{3\times 3} \\ \vdots \\ I_{3\times 3} \end{bmatrix}_{3n\times 3} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix}_{3n\times 3}$$

$$r_1 = \begin{bmatrix} I_{3\times 3} \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{3n_1\times 3}, \quad r_2 = \begin{bmatrix} I_{3\times 3} \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{3n_2\times 3},$$

$$r_3 = \begin{bmatrix} I_{3\times 3} \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{3n_3\times 3} \tag{۱۰}$$

حال اگر مطابق شکل ۳ سیستم اصلی به سه زیرسیستم، با ابعاد n_1, n_2, n_3 تقسیم شود، می‌توان نسبت به تفکیک معادلات حرکت طبق رابطه‌ی ۱۱ اقدام کرد:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & M_{22} & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} \end{bmatrix}_{3n\times 3n} \begin{bmatrix} \ddot{\overline{X}}_1 \\ \ddot{\overline{X}}_2 \\ \ddot{\overline{X}}_3 \end{bmatrix}_{3n\times 1} +$$
$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ 0 & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\overline{X}}_1 \\ \dot{\overline{X}}_2 \\ \dot{\overline{X}}_3 \end{bmatrix} +$$
$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & 0 \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ 0 & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}_{3n\times 3n} \begin{bmatrix} \overline{X}_1 \\ \overline{X}_2 \\ \overline{X}_3 \end{bmatrix}_{3n\times 1} =$$
$$-\begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & M_{22} & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} \end{bmatrix}_{3n\times 3n} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix}_{3n\times 3} \ddot{U}_{g\,3\times 1} +$$
$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & 0 \\ 0 & H_{22} & H_{23} \\ 0 & 0 & H_{33} \end{bmatrix}_{3n\times 3a} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix}_{3a\times 1} \tag{۱۱}$$

که در آن بردارهای $\overline{X}_1, \overline{X}_2, \overline{X}_3$ بردارهای جابه‌جایی نسبی طبقات زیرسیستم‌ها (نسبت به تکیه‌گاه) و U_1, U_2, U_3 بردارهای نیروی کنترل مربوط به آن‌ها بوده و طبق رابطه ۱۲ تعریف می‌شوند.

$$\overline{X}_1 = \begin{Bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{3n_1} \end{Bmatrix}_{3n_1\times 1}, \quad \overline{X}_2 = \begin{Bmatrix} x_{3n_1+1} \\ \vdots \\ x_{3(n_1+n_2)} \end{Bmatrix}_{3n_2\times 1},$$

$$\overline{X}_3 = \begin{Bmatrix} x_{3(n_1+n_2)+1} \\ \vdots \\ x_{3n} \end{Bmatrix}_{3n_3\times 1}$$

$$U_1 = \begin{Bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_K \end{Bmatrix}_{k\times 1}, \quad U_2 = \begin{Bmatrix} u_{K+1} \\ \vdots \\ u_l \end{Bmatrix}_{(l-k)\times 1},$$

$$U_3 = \begin{Bmatrix} u_{l+1} \\ \vdots \\ u_{3a} \end{Bmatrix}_{(3a-k-l)\times 1} \tag{۱۲}$$

چنان که گفته شد، x_i درجات آزادی تغییر مکان نسبت به تکیه‌گاه و u_k نیروی کنترل در kامین کنترل کننده است. برای هر زیرسیستم خواهیم داشت:

$$\begin{cases} M_{11}\ddot{\bar{X}}_1 + C_{11}\dot{\bar{X}}_1 + K_{11}\bar{X}_1 = -M_{11}r_1 \times \left\{\ddot{U}_g\right\}_{3\times 1} \\ +H_{11}U_1 + H_{12}U_2 - C_{12}\dot{\bar{X}}_2 - K_{12}\bar{X}_2 \\ M_{22}\ddot{\bar{X}}_2 + C_{22}\dot{\bar{X}}_2 + K_{22}\bar{X}_2 = -M_{22}r_2 \times \left\{\ddot{U}_g\right\}_{3\times 1} \\ +H_{22}U_2 + H_{23}U_3 - C_{23}\dot{\bar{X}}_3 - C_{21}\dot{\bar{X}}_1 - K_{23}\bar{X}_3 - K_{21}\bar{X}_1 \\ M_{33}\ddot{\bar{X}}_3 + C_{33}\dot{\bar{X}}_3 + K_{33}\bar{X}_3 = -M_{33}r_3 \times \left\{\ddot{U}_g\right\}_{3\times 1} \\ +H_{33}U_3 - C_{32}\dot{\bar{X}}_2 - K_{32}\bar{X}_2 \end{cases} \tag{13}$$

همچنین می‌توان معادلات هر زیرسیستم را به فضای حالت تبدیل کرد. مثلاً برای زیرسیستم میانی (شماره‌ی ۲) با توجه به معادله‌ی ۱۳ خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{X}}_2 \\ \ddot{\bar{X}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_{22}^{-1}K_{22} & -M_{22}^{-1}C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{X}_2 \\ \dot{\bar{X}}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -r_2 \end{bmatrix} \ddot{U}_g + \begin{bmatrix} 0 \\ M_{22}^{-1}H_{22} \end{bmatrix} U_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ M_{22}^{-1}H_{23} \end{bmatrix} U_3 + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -M_{22}^{-1}K_{21} & -M_{22}^{-1}C_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{X}_1 \\ \dot{\bar{X}}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -M_{22}^{-1}K_{23} & -M_{22}^{-1}C_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{X}_3 \\ \dot{\bar{X}}_3 \end{bmatrix} \tag{14}$$

برای زیرسیستم‌های ۱ و ۳ نیز به روش مشابه می‌توان معادلات حرکت را در فضای حالت به‌دست آورد. در حالت کلی در فضای حالت این معادلات چنین خلاصه می‌شوند:

$$\tilde{X}_1 = \begin{bmatrix} \bar{X}_1 \\ \dot{\bar{X}}_1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{X}_2 = \begin{bmatrix} \bar{X}_2 \\ \dot{\bar{X}}_2 \end{bmatrix}, \quad \tilde{X}_3 = \begin{bmatrix} \bar{X}_3 \\ \dot{\bar{X}}_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \dot{\tilde{X}}_1 = A_1\tilde{X}_1 + B_1U_1 + E_1\ddot{U}_g + A_{12}\tilde{X}_2 + B_{12}U_2 \\ \dot{\tilde{X}}_2 = A_2\tilde{X}_2 + B_2U_2 + E_2\ddot{U}_g + A_{21}\tilde{X}_1 + A_{23}\tilde{X}_3 + B_{23}U_3 \\ \dot{\tilde{X}}_3 = A_3\tilde{X}_3 + B_3U_3 + E_3\ddot{U}_g + A_{32}\tilde{X}_2 \end{cases} \tag{15}$$

که در آن:

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_{ii}^{-1}K_{ii} & -M_{ii}^{-1}C_{ii} \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ M_{ii}^{-1}H_{ii} \end{bmatrix},$$

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -M_{ii}^{-1}K_{ij} & -M_{ii}^{-1}C_{ij} \end{bmatrix}$$

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 0 \\ M_{ii}^{-1}H_{ij} \end{bmatrix}, \quad E_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -r_1 \end{bmatrix}, \quad E_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -r_2 \end{bmatrix},$$

$$E_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ -r_3 \end{bmatrix} \; or \; E_i = \begin{bmatrix} 0 \\ -r_i \end{bmatrix}$$

در حالت کلی اگر یک سیستم به m زیرسیستم و هر زیرسیستم با n_i طبقه تقسیم شود، معادله‌ی کلی زیرسیستم iام در فضای حالت برحسب جابه‌جایی طبقات نسبت به دستگاه طبق رابطه‌ی ۱۶ خواهد بود:

$$\dot{\tilde{X}}_i = A_i\tilde{X}_i + B_iU_i + E_i\ddot{U}_g + A_{i\;i-1}\tilde{X}_{i-1} + A_{i\;i+1}\tilde{X}_{i+1} + B_{i\;\;i+1}U_{i+1} \tag{16}$$

که در آن U_i فرمان کنترلی زیرسیستم iام، و U_{i+1} فرمان کنترلی زیرسیستم بالایی است. چنان که مشاهده می‌شود، در این حالت معادله‌ی هر زیرسیستم به فرمان‌های کنترلی زیرسیستم فوقانی آن بستگی دارد. در این روابط مقدار پارامترهای با اندیس صفر و اندیس‌های بیش از m صفر خواهد بود.

۳. مروری بر الگوریتم کنترل

کنترل بهینه‌ی لحظه‌یی ازجمله الگوریتم‌های تعیین نیروی کنترلی است که به سه صورت حلقه‌ی باز، حلقه‌ی بسته، و حلقه‌ی باز ـ بسته قابل استفاده است. در روش ارائه‌شده در سال ۱۹۹۱،[۲] معیار عملکرد زیر در هر لحظه از زمان بهینه می‌شود:

$$J(t) = X^TQX + U^TRU \tag{17}$$

که در آن $Q_{2n\times 2n}$ یک ماتریس مثبت نیمه‌معین، و $R_{r\times r}$ یک ماتریس مثبت معین است. معادله‌ی دینامیکی سیستم مورد نظر در این مطالعه را با استفاده از تبدیل T می‌توان به‌صورت غیردرگیر درآورد:

$$X(t) = TY(t) \tag{18}$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱۸، معادلات دینامیکی حاکم بر رفتار سیستم در فضای حالت (یعنی معادله‌ی ۹) تبدیل می‌شود به:

$$\dot{Y}(t) = \theta Y(t) + F(t), \qquad Y(0) = 0 \tag{19}$$

که در آن $\theta_{6n\times 6n}$ ماتریسی قطری است که اعضای قطر آن مقادیر ویژه‌ی مختلط θ_j $(j = 1, 2, ..., 6n)$ از ماتریس A هستند؛ و نیز:

$$F(t) = T^{-1}\left[BU(t) + E\ddot{U}_g(t)\right] \tag{20}$$

پاسخ معادله را می‌توان چنین نوشت:

$$Y(t) = \int_o^t \exp\left[\theta(t-\tau)\right]F(\tau)d\tau \tag{21}$$

با ترکیب معادلات بالا می‌توان به رابطه‌ی ۲۲ برحسب فضای حالت رسید:

$$X(t) = Te^{\theta\Delta t}T^{-1}X(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2}T\left[e^{\theta\Delta t}f(t-\Delta t) + f(t)\right] \tag{22}$$

که در آن:

$$D(t-\Delta t) = e^{\theta\Delta t}T^{-1}\left\{X(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2}\left[BU(t-\Delta t) + E\ddot{U}_g(t-\Delta t)\right]\right\} \tag{23}$$

در بردار $D(t-\Delta t)$ تمامی جملات در لحظه‌ی $t-\Delta t$ هستند. تابع هامیلتونین این سیستم عبارت خواهد بود از:

$$H = X^T(t)QX(t)+U^T(t)RU(t)+\lambda^T\Big\{X(t)-TD(t-\Delta t) -\frac{\Delta t}{2}\Big[BU(t)+E\ddot{U}_g(t)\Big]\Big\} \qquad (۲۴)$$

که در آن $\lambda(t)$ بردار ضرایب لاگرانژ است. شرایط لازم برای کمینه‌سازی معیار عملکرد $J(t)$ عبارتند از:

$$2QX(t)+\lambda(t)=0$$
$$2RU(t)-\frac{\Delta t}{2}B^T\lambda(t)=0$$
$$X(t)=Te^{\theta\Delta t}T^{-1}X(t-\Delta t)+\frac{\Delta t}{2}T\Big[e^{\theta\Delta t}F(t-\Delta t)+F(t)\Big] \qquad (۲۵)$$

در الگوریتم کنترل حلقه‌ی بسته، بردار کنترل $U(t)$ و بردار $\lambda(t)$ به‌وسیله‌ی بردار حالت تنظیم می‌شوند؛ یعنی $\lambda(t)=-2QX(t)$. بنابراین نیروی کنترل عبارت خواهد بود از:

$$U(t)=-\frac{\Delta t}{2}R^{-1}B^TQX(t) \qquad (۲۶)$$

که در آن Δt فاصله‌ی زمانی مورد بررسی در بهینه‌سازی معیار کنترل، R ضریب وزنی نیروی کنترل، Q ضریب وزنی جابه‌جایی، B ماتریس موقعیت نیروی کنترل و X بردار حالت است. اگرچه نیروی کنترل در این روش به‌نحو بهینه تعیین می‌شود، برای برخی از ماتریس‌های Q احتمال ناپایداری سیستم وجود خواهد داشت. برای تضمین پایداری سیستم می‌توان به تولید ماتریس Q از طریق حل معادله‌ی لیاپانوف پرداخت.[2] با اعمال رابطه‌ی قبلی می‌توان نوشت:

$$\dot{X}=(A-\frac{\Delta t}{2}BR^{-1}B^TQ)X+E\ddot{U}_g \qquad (۲۷)$$

حال اگر تابع مثبت نیمه‌معین لیاپانوف به‌صورت رابطه‌ی ۲۸ نظر گرفته شود:

$$V(X)=X^TQX\geq 0 \qquad (۲۸)$$

ماتریس Q باید چنان انتخاب شود که:

$$\dot{V}(X)\leq 0 \quad , \quad \forall X\neq 0 \qquad (۲۹)$$

مشتق این رابطه نسبت به زمان برابر است با:

$$\dot{V}=\dot{X}^TQX+X^TQ\dot{X}=X^T(A^TQ+QA-\frac{\Delta t}{2}QBR^{-1}B^TQ)X \qquad (۳۰)$$

چون ماتریس R مثبت معین است، عبارت $-\frac{\Delta t}{2}QBR^{-1}B^TQ$ منفی نیمه‌معین خواهد بود. بنابراین اگر عبارت A^TQ+QA مطابق رابطه ۳۱ منفی نیمه‌معین درنظر گرفته شود، نرخ تغییر تابع $V(X)$ که به‌نوعی نشان‌گر انرژی کل سیستم دینامیکی است، ثابت می‌ماند یا منفی خواهد شد؛ بنابراین پایداری سیستم دینامیکی تضمین می‌شود:

$$A^TQ+QA=-I_0 \qquad (۳۱)$$

در رابطه‌ی ۳۱، I_0 یک ماتریس مثبت نیمه‌معین است. در این صورت با حل معادله‌ی لیاپانوف و تعیین ماتریس Q پایداری سیستم تأمین می‌شود. یقیناً این مسئله مستقل از طول بازه زمانی مورد استفاده برای کنترل یعنی Δt خواهد بود.

۴. طراحی کنترل‌کننده‌ها

براساس معادله‌ی فضای حالت، مقدار نیروی کنترلی تابعی از بردار حالت، و به‌عبارتی تابعی از پارامترهای جابه‌جایی و سرعت است. بنابراین می‌توان نوشت:

$$U=GX, \qquad G=-\frac{\Delta t}{2}R^{-1}B^TQ \qquad (۳۲)$$

در حالت سه‌بعدی اگر تمامی درجات آزادی دارای کنترل کننده باشند ماتریس G ماتریسی با ابعاد $6n\times 3n$ خواهد بود. همچنین اگر در a طبقه دارای کنترل‌کننده باشیم، ماتریس G به ابعاد $6n\times 3a$ خواهد بود. چنان که گفته شد، در این رابطه ماتریس‌های R و Q ماتریس‌های وزنی هستند. ماتریس Q در حالت سه‌بعدی از جمع سه ماتریس Q_r, Q_y, Q_x تشکیل می‌شود:

$$Q=Q_x+Q_y+Q_r \qquad (۳۳)$$

هریک از ماتریس‌های Q_r, Q_y, Q_x, Q چنین تعریف می‌شود:

$$Q_{6n*6n}=\eta\begin{bmatrix} Q_{11_{3n*3n}} & Q_{12_{3n*3n}} \\ Q_{21_{3n*3n}} & Q_{22_{3n*3n}}\end{bmatrix},$$
$$Q_{ij}=\begin{bmatrix} q_{xx} & q_{xy} & q_{xr} \\ q_{yx} & q_{yy} & q_{yr} \\ q_{rx} & q_{ry} & q_{rr}\end{bmatrix}_{3\times 3}$$
$$Q_x=\eta_x\begin{bmatrix} Q_{x11} & Q_{x12} \\ Q_{x21} & Q_{x22}\end{bmatrix}, \quad Q_y=\eta_y\begin{bmatrix} Q_{y11} & Q_{y12} \\ Q_{y21} & Q_{y22}\end{bmatrix},$$
$$Q_r=\eta_r\begin{bmatrix} Q_{r11} & Q_{r12} \\ Q_{r21} & Q_{r22}\end{bmatrix} \qquad (۳۴)$$

در این روابط پارامترهای η_r, η_y, η_x ضرایب وزنی‌اند که برای تنظیم میزان کاهش در پاسخ زیرسیستم‌ها مورد استفاده قرار خواهند گرفت. با توجه به مستقل‌بودن روابط در جهات x و y، مؤلفه‌های q_{xy}, q_{yx} برابر صفر خواهند بود. به‌روش مشابه می‌توان برای $Q_{x6n\times 6n}$، $Q_{y6n\times 6n}$ و $Q_{r6n\times 6n}$ نیز نوشت:

$$Q_{ijx}=\begin{bmatrix} q_{xx} & 0 & q_{xr} \\ 0 & 0 & 0 \\ q_{rx} & 0 & 0\end{bmatrix}_{3\times 3}, \quad Q_{ijy}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{yy} & q_{yr} \\ 0 & q_{ry} & 0\end{bmatrix}_{3\times 3},$$
$$Q_{ijr}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{rr}\end{bmatrix}_{3\times 3} \qquad (۳۵)$$

اگر این سه ماتریس در معادله‌ی کلی پایداری لیاپانوف جایگذاری شود خواهیم داشت:

$$A^TQ+QA=A^T(Q_x+Q_y+Q_r)+(Q_x+Q_y+Q_r)A=-I_o \qquad (۳۶)$$

که در آن I_o یک ماتریس مثبت نیمه‌معین (ترجیحاً قطری) است. با بسط ماتریس‌های A و Q داریم:

$$Q=Q_x+Q_y+Q_r$$
$$A=A_x+A_y+A_r$$

ماتریس‌های A_x, A_y, A_r با حذف جملات غیرمرتبط با جهت‌های x و y و دوران از ماتریس A به‌دست می‌آیند. بسط معادله‌ی لیاپانوف چنین خواهد بود:

$$\left(A_x^T + A_y^T + A_r^T\right)(Q_x + Q_y + Q_r) + (Q_x + Q_y + Q_r)$$
$$(A_x + A_y + A_r) = -I_o$$

می‌توان ثابت کرد که با تعیین ماتریس‌های Q_x, Q_y, Q_r از طریق:

$$A_x^T Q_x + Q_x A_x = -I_{ox}$$
$$A_y^T Q_y + Q_y A_y = -I_{oy} \qquad I_o = I_{ox} + I_{oy} + I_{or}$$
$$A_r^T Q_r + Q_r A_r = -I_{or} \qquad (۳۷)$$

ماتریس $Q = Q_x + Q_y + Q_r$ معادله‌ی لیاپانوف سه‌بعدی را برآورده خواهد کرد. تعیین جداگانه‌ی ماتریس‌های Q_x، Q_y و Q_r بر قابلیت‌های سیستم کنترل در کاهش پاسخ مدل‌های سازه‌یی سه‌بعدیِ دارای خروج از مرکزیت خواهد افزود.

۱.۴. کنترل‌کننده با بازخورد سرعت

درصورت استفاده از بازخورد سرعت، ماتریس‌های Q_x، Q_y، Q_r، I_{ox}، I_{oy}، I_{or} چنین تعریف می‌شوند:

$$Q_x = \eta_x \begin{bmatrix} Q_{x11} & Q_{x12} \\ Q_{x21} & Q_{x22} \end{bmatrix}, \qquad I_{ox} = \begin{bmatrix} I_{1x} & 0 \\ 0 & I_{2x} \end{bmatrix}$$
$$Q_y = \eta_y \begin{bmatrix} Q_{y11} & Q_{y12} \\ Q_{y21} & Q_{y22} \end{bmatrix}, \qquad I_{oy} = \begin{bmatrix} I_{1y} & 0 \\ 0 & I_{2y} \end{bmatrix}$$
$$Q_r = \eta_r \begin{bmatrix} Q_{r11} & Q_{r12} \\ Q_{r21} & Q_{r22} \end{bmatrix}, \qquad I_{or} = \begin{bmatrix} I_{1r} & 0 \\ 0 & I_{2r} \end{bmatrix} \qquad (۳۸)$$

به‌عنوان یک انتخاب، ماتریس‌های Q_x, Q_y, Q_r به‌صورت رابطه‌ی ۳۹ در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} Q_{x11} = k_x \\ Q_{x22} = M_x \end{cases}, \qquad \begin{cases} Q_{y11} = k_y \\ Q_{y22} = M_y \end{cases}, \qquad \begin{cases} Q_{r11} = k_r \\ Q_{r22} = M_r \end{cases} \qquad (۳۹)$$

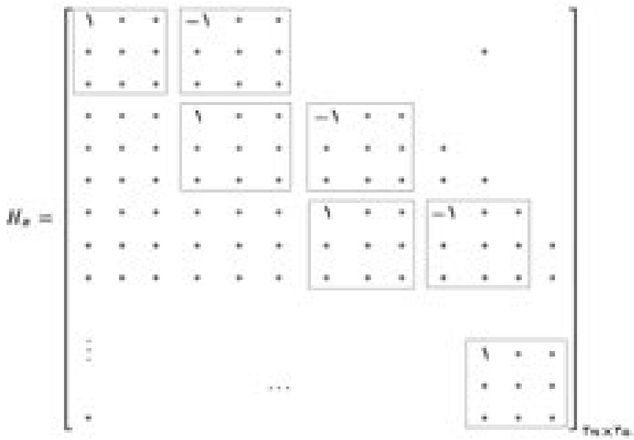
ماتریس‌های K_x، K_y، K_r، M_x، M_y، M_r به‌ترتیب با حذف جملات غیرمرتبط با جهات x, y, r در ماتریس‌های K, M قابل تعیین‌اند. ضرایب η_x, η_y, η_r نیز اعدادی بزرگ‌تر از صفرند. با جایگذاری این ماتریس‌ها در روابط قبلی، المان‌های ماتریس‌های I_{ox}, I_{oy}, I_{or}ــ که ماتریس‌های مثبت و نیمه‌معین‌اند ــ به‌صورت رابطه‌ی ۴۰ قابل تعیین‌اند:

$$I_{1x} = I_{1y} = I_{1r} = 0, \qquad I_{2x} = 2C\eta_x,$$
$$I_{2y} = 2C\eta_y, \qquad I_{2r} = 2C\eta_r \qquad (۴۰)$$

با توجه به شرایط و مقادیر ماتریس‌های Q و I_o روابط پایداری در هر راستا برقرار خواهند بود. با جایگذاری ماتریس Q در ماتریس بهره G می‌توان نوشت:

$$G = G_x + G_y + G_r = -\frac{\Delta t}{2} R^{-1} \begin{bmatrix} 0 & \left(M_x^{-1} H_x\right)^T \end{bmatrix} \eta_x$$
$$\begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & M_x \end{bmatrix} - \frac{\Delta t}{2} R^{-1} \begin{bmatrix} 0 & \left(M_y^{-1} H_y\right)^T \end{bmatrix} \eta_y \begin{bmatrix} k_y & 0 \\ 0 & M_y \end{bmatrix}$$
$$-\frac{\Delta t}{2} R^{-1} \begin{bmatrix} 0 & \left(M_r^{-1} H_r\right)^T \end{bmatrix} \eta_r \begin{bmatrix} k_r & 0 \\ 0 & M_r \end{bmatrix} \qquad (۴۱)$$

که در آن ماتریس‌های H_x, H_y, H_r، ماتریس‌های مستقل مرتبط با نیروی کنترل در هر جهت است. مثلاً H_x به‌صورت زیر ارائه شده و برای راستای y و r نیز به‌طور مشابه می‌توان درایه‌های مرتبط با سایر راستاها را مساوی صفر قرار داد:



با فرض این که $R^{-1} = r$، می‌توان داشت:

$$\begin{cases} G_x = -\frac{\Delta t}{2} \begin{bmatrix} 0 & r\eta_x H_x^T \end{bmatrix} \\ G_y = -\frac{\Delta t}{2} \begin{bmatrix} 0 & r\eta_y H_y^T \end{bmatrix} \\ G_r = -\frac{\Delta t}{2} \begin{bmatrix} 0 & r\eta_r H_r^T \end{bmatrix} \end{cases} \Rightarrow$$
$$G = -\frac{\Delta t}{2} r \begin{bmatrix} 0 & \left(\eta_x H_x^T + \eta_y H_y^T + \eta_r H_r^T\right) \end{bmatrix} \qquad (۴۲)$$

در حالت سه‌بعدی، G یک ماتریس $(3n \times 6n)$ است که می‌توان آن را به دو قسمت G_1, G_2 با ابعاد $3n \times 3n$ تقسیم کرد:

(۴۳)

هریک از جملات ماتریس G_2 نشان داده شده با (*)، یک ماتریس 3×3 و غیرصفر است. با توجه به ضرب این ماتریس در $X = \left\{\begin{matrix} X \\ \dot{X} \end{matrix}\right\}$ خواهیم داشت $U = GX = G_2\dot{X}$، که به‌معنای استفاده از بازخورد سرعت در تعیین نیروی کنترل خواهد بود. در حالت کنترل نامتمرکز، اگر فرض شود که سازه به سه زیرسازه ــ هریک با تعداد درجات آزادی $3n_1, 3n_2, 3n_3$ ــ تقسیم شده، با فرض $3n = 3n_1 + 3n_2 + 3n_3$ ماتریس G می‌تواند به سه زیرماتریس براساس ابعاد هر زیرسیستم و ماتریس‌های کنترلی واسطه بین زیرسیستم‌ها تقسیم شود. با توجه به

ارتباط نداشتن زیرسیستم‌های ۱ و ۳، و نبودن ارتباط معکوس بین زیرسیستم‌های همسایه، ماتریس‌های G در آن‌ها برابر صفر خواهند بود.

$$G=\left[\begin{array}{c:c:c:c:c:c} O & O & O & g_{11} & g_{12} & O \\ \hdashline O & O & O & O & g_{22} & g_{23} \\ \hdashline O & O & O & O & O & g_{33} \end{array}\right] \qquad (۴۴)$$

با تعریف پارامترهای:

$$G_{11}=\left[\begin{array}{ccc} 0 & \vdots & g_{11}\end{array}\right]_{3n1*6n1},\ G_{22}=\left[\begin{array}{ccc} 0 & \vdots & g_{22}\end{array}\right]_{3n2*6n2},$$
$$G_{33}=\left[\begin{array}{ccc} 0 & \vdots & g_{33}\end{array}\right]_{3n3*6n3}$$
$$G_{12}=\left[\begin{array}{ccc} 0 & \vdots & g_{12}\end{array}\right]_{3n1*6n2},\ G_{23}=\left[\begin{array}{ccc} 0 & \vdots & g_{23}\end{array}\right]_{3n2*6n3} \qquad (۴۵)$$

نیروهای کنترل برای هر زیرسیستم را می‌توان چنین نوشت:

$$U_1=G_{11}\tilde{X}_1+G_{12}\tilde{X}_2$$
$$U_2=G_{22}\tilde{X}_2+G_{23}\tilde{X}_3$$
$$U_3=G_{33}\tilde{X}_3 \qquad (۴۶)$$

باید توجه داشت که مثلاً از بردار $\tilde{X}_2$ در تعیین نیروی کنترل زیرسیستم ۱، فقط درجه آزادی‌های مجاور در تعیین مقدار نیروی کنترل این زیرسیستم تأثیرگذار خواهند بود. ماتریس G_{12} نیز صرفاً دارای ۹ مؤلفه‌ی (3×3) غیرصفر بوده و سایر مؤلفه‌های آن صفر است. به‌همین ترتیب می‌توان برای نیروی کنترل اعمالی به زیرسیستم شماره ۲ نتیجه‌گیری کرد.

۲.۴. طراحی کنترل‌کننده‌ها بازخورد جابه‌جایی و سرعت

در این حالت برای رابطه‌ی کلی $A^TQ+QA=-I_o$ نیز باید ماتریس I_o مثبت و نیمه‌معین باشد. با توجه به این که ماتریس به‌صورت حاصل جمع سه ماتریس $Q=Q_x+Q_y+Q_r$ فرض شده، و نیز با فرض مؤلفه‌های:

$$\begin{cases} Q_{x11}=k_x+\rho_x c_x \\ Q_{y11}=k_y+\rho_y c_y \\ Q_{r11}=k_r+\rho_r c_r \end{cases},\qquad \begin{cases} Q_{x22}=M_x \\ Q_{y22}=M_y \\ Q_{r22}=M_r \end{cases},$$
$$\begin{cases} Q_{x21}=Q_{x12}=\rho_x M_x \\ Q_{y21}=Q_{y12}=\rho_y M_y \\ Q_{r21}=Q_{r12}=\rho_r M_r \end{cases} \qquad (۴۷)$$

برای نمونه در جهت x می‌توان داشت:

$$A_x^TQ_x+Q_xA_x=-I_{ox}$$
$$\eta_x\begin{bmatrix} 0 & -\left(M_x^{-1}k_x\right)^T \\ I_x & -\left(M_x^{-1}c_x\right)^T\end{bmatrix}\begin{bmatrix} k_x+\rho_x c_x & \rho_x M_x \\ \rho_x M_x & M_x\end{bmatrix}$$
$$+\eta_x\begin{bmatrix} k_x+\rho_x c_x & \rho_x M_x \\ \rho_x M_x & M_x\end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 & I_x \\ -M_x^{-1}k_x & -M_x^{-1}c_x\end{bmatrix}=-I_{ox}$$

$$\eta_x\begin{bmatrix} -\rho_x k_x & -k_x^T \\ k_x+\rho_x c_x^T-\rho_x c_x^T & \rho_x M_x-c_x^T\end{bmatrix}$$
$$+\eta_x\begin{bmatrix} -\rho_x k_x & k_x \\ -k_x & \rho_x M_x-c_x\end{bmatrix}=-I_{ox}$$
$$\eta_x\begin{bmatrix} -2\rho_x k_x & 0 \\ 0 & 2\rho_x M_x-2c_x\end{bmatrix}=-I_{ox} \qquad (۴۸)$$

به روش مشابه می‌توان برای سایر راستاها نیز این مسئله را اثبات کرد. با توجه به این که ρ یک عدد مثبت کوچک است $(\rho=\in>o)$، درنتیجه ماتریس I_o می‌تواند به‌گونه‌یی تعریف شود که مثبت و نیمه‌معین باشد و متضمن پایداری سیستم دینامیکی باشد. با جایگذاری ماتریس Q پیشنهادی در رابطه‌ی ماتریس بهره، این ماتریس تبدیل خواهد شد به:

$$G=G_x+G_y+G_r=-\frac{\Delta t}{2}R^{-1}(\eta_x\left[\begin{array}{cc} 0 & \left(M_x^{-1}H_x\right)^T\end{array}\right]$$
$$\begin{bmatrix} k_x+\rho_x c_x & \rho_x M_x \\ \rho_x M_x & M_x\end{bmatrix}+\eta_y\left[\begin{array}{cc} 0 & \left(M_y^{-1}H_y\right)^T\end{array}\right]$$
$$\begin{bmatrix} k_y+\rho_y c_y & \rho_y M_y \\ \rho_y M_y & M_y\end{bmatrix}+\eta_r\left[\begin{array}{cc} 0 & \left(M_r^{-1}H_r\right)^T\end{array}\right]$$
$$\begin{bmatrix} k_r+\rho_r c_r & \rho_r M_r \\ \rho_r M_r & M_r\end{bmatrix})=-\frac{\Delta t}{2}R^{-1}$$
$$\left[\eta_x\rho_x H_x^T+\eta_y\rho_y H_y^T+\eta_r\rho_r H_r^T\ \vdots\ \eta_x H_x^T+\eta_y H_y^T+\eta_r H_r^T\right] \qquad (۴۹)$$

دراین حالت نیز می‌توان ماتریس G را با ابعاد $3n\times 6n$ و به‌صورت $G=[G_1\ ,\ G_2]$ تعریف کرد که در آن عناصر قطری با عرض باند ۶ غیرصفرند و بقیه‌ی مؤلفه‌ها صفر است. حال درصورت تقسیم سیستم n طبقه و $3n$ درجه آزادی به سه زیرسیستم با طبقات n_1، n_2، n_3 و درجات آزادی $3n_1, 3n_2, 3n_3$، می‌توان برای ماتریس G تقسیم‌بندی زیر را انجام داد:

$$G=\left[\begin{array}{c:c:c:c:c:c} g1_{11} & g1_{12} & O & g2_{11} & g2_{12} & O \\ \hdashline O & g1_{22} & g1_{23} & O & g2_{22} & g2_{23} \\ \hdashline O & O & g1_{33} & O & O & g2_{33} \end{array}\right] \qquad (۵۰)$$

و در نتیجه ماتریس بهره نیروهای کنترل اعمالی بر هر زیرسیستم عبارت خواهد بود از:

$$G_{11}=\left[\begin{array}{ccc} g1_{11} & \vdots & g2_{11}\end{array}\right],\ G_{22}=\left[\begin{array}{ccc} g1_{22} & \vdots & g2_{22}\end{array}\right],$$
$$G_{33}=\left[\begin{array}{ccc} g1_{33} & \vdots & g2_{33}\end{array}\right]$$
$$G_{12}=\left[\begin{array}{ccc} g1_{12} & \vdots & g2_{12}\end{array}\right],\ G_{23}=\left[\begin{array}{ccc} g1_{23} & \vdots & g2_{23}\end{array}\right], \qquad (۵۱)$$

که همچون حالت مربوط به بازخورد سرعت، با توجه به ارتباط نداشتن زیرسیستم‌های ۱ و ۳ و نبودن ارتباط معکوس بین زیرسیستم‌های همسایه، درایه‌های مرتبط با آن‌ها در ماتریس G صفر بوده و در نتیجه نیروهای کنترلی برای هر زیرسیستم را می‌توان

چنین نوشت:

$$U1 = G_{11}\tilde{X}_1 + G_{12}\tilde{X}_2$$
$$U2 = G_{22}\tilde{X}_2 + G_{23}\tilde{X}_3$$
$$U3 = G_{33}\tilde{X}_3 \quad (52)$$

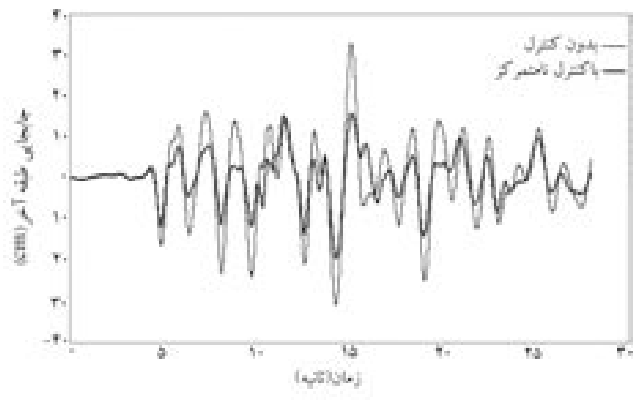
۵. مثال عددی

برای کنترل عملکرد الگوریتم پیشنهادی و اثبات یکی‌بودن نتایج دو حالت کنترل متمرکز و نامتمرکز، نسبت به انجام یک مطالعه‌ی موردی اقدام شد. برای این منظور ساختمان ۲۵ طبقه‌یی در نظرگرفته شده که جرم تمامی طبقات آن یکسان و برابر ۷۵۰ تُن فرض شده است. سختی هر ۵ طبقه با یکدیگر یکسان و سختی طبقات از ترازهای پایین به بالا کاهش می‌یابد. مقدار این سختی در ۵ طبقه‌ی پایین برابر ۴۵۰۰ MN/m و در ۵ طبقه‌ی آخر ۹۰۰ MN/m در نظرگرفته شد؛ ماتریس میرایی نیز برابر $C = 0{,}05$ K فرض شده است. ابعاد سازه در پلان ۲۰ × ۲۰ فرض شده ($L = 20$ m)، و زمان‌های تناوب ۵ مود اول لرزش سازه به‌ترتیب برابر ۱٫۵۸، ۰٫۶۴، ۰٫۳۹، ۰٫۲۷۵ و ۰٫۲۱ ثانیه هستند. لازم به ذکر است با استفاده از فرض عملکرد دیافراگمی برای کف‌ها، می‌توان دو آرایش از ستون‌ها با سختی مختلف در جهات متعامد را به مدل ریاضی ساده‌ی انتخاب شده در این مطالعه، برمبنای سه درجه آزادی برای هر طبقه کاهش داد. همچنین پس از تعیین نیروهای کنترلی ـــ شامل دو نیرو در جهات متعامد و یک گشتاور در امتداد محور عمود بر مرکز سختی ـــ به ترکیب مناسبی از نیروهای کنترلی خواهیم رسید. در این مثال از مؤلفه‌ی S-E زلزله‌ی طبس ۱۳۵۷ با PGA=۰٫۸۴ g به‌عنوان تحریک خارجی اعمالی به سازه در جهات y و x بهره‌گرفته شده است. براساس فرض، در تمامی طبقات عملگر[17] وجود داشته و سازه در حالت نامتمرکز با تعداد درجات آزادی گوناگونی در هر زیرسیستم بررسی خواهد شد. برای کنترل سازه از الگوریتم کنترل بهینه‌ی لحظه‌یی با ماتریس‌های وزنی زیر استفاده شده است:

$$R = \left(1 \times 10^{-8}\right) I_{75\times 75}, \qquad Q = \eta \times \begin{bmatrix} K & \rho M \\ \rho M & M \end{bmatrix}_{150\times 150} \quad (53)$$

با توجه به این که در مدل سازه‌ی برشی در نظرگرفته شده برای هر کف دو درجه آزادی انتقالی X و Y و یک درجه آزادی دورانی درنظرگرفته شده، ماتریس I و Q به‌ترتیب دارای ابعاد ۷۵ × ۷۵ و۱۵۰ × ۱۵۰ خواهند بود. ماتریس بهره در حالت بازخورد جابه‌جایی و سرعت معادل $G = \frac{-\Delta t}{2} R^{-1} \times B^T \times Q$ بوده و Δt نیز در این مطالعه برابر $\Delta t = 0{,}005$ sec در نظرگرفته شده است. تمامی تحلیل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار Matlab انجام شده و نتایج به‌دست آمده در حالت‌های مختلفی مورد بررسی قرارگرفتند. در جداول ۱ الی ۳ و شکل ۵، نتایج حاصل از اعمال کنترل متمرکز و نامتمرکز با حالت بدون کنترل مقایسه شده‌اند. پاسخ‌های سازه‌یی به‌دست آمده در دو حالت کنترل متمرکز وکنترل نامتمرکز تقریباً یکسان بوده است. چنان که ذکر شد، در محاسبات عددی از شتاب‌نگاشت زلزله‌ی یکسان در دو راستای x و y استفاده شده است. همچنین در این بخش خروج از مرکزیت در هر دو راستا برابر صفر درنظرگرفته شده است. سختی سازه‌یی در راستاهای x و y یکسان فرض شده و تعداد سه زیرسیستم برای حالت‌های تحلیل درنظر گرفته شده‌اند. تحلیل‌ها در این حالات به‌صورت سه‌بعدی انجام شده‌اند.

در جدول ۱، پاسخ‌های بیشینه سازه‌یی برای حالت‌های بدون کنترل و با کنترل



شکل ۵. نمودار جابه‌جایی طبقه‌ی آخر (مدل بدون خروج از مرکزیت با سه زیر سیستم)، در دو حالت بدون کنترل و با کنترل نامتمرکز برای $\eta = 1 \times 10^3$ و $\rho = 0$ که کاهشی در حدود ۵۰٪ در پاسخ‌ها را برای حالت با کنترل نشان می‌دهد.

جدول ۱. نتایج تقریباً یکسانِ کنترل متمرکز و نامتمرکز سازه، برای ساختمان ۲۵ طبقه در حالت سه‌بعدی بدون خروج از مرکزیت برای $\rho = 0$ و مقادیر مختلف η و تعداد سه زیر سیستم.

$\frac{U_{max}}{W_t}$	بیشینه نیروی کنترل U ۳ (kN)	بیشینه نیروی کنترل U۲ (kN)	بیشینه نیروی کنترل U ۱ (kN)	بیشینه برش (kN)	بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقه‌یی (m)	بیشینه شتاب مطلق (m/s²)	بیشینه سرعت نسبی (m/s)	بیشینه جابه‌جایی نسبی (m)	ضریب مقیاس η	وضعیت کنترل
–	–	–	–	$5{,}5 \times 10^4$	۰٫۰۱۹	۱۲٫۰۶	۱٫۲۱	۰٫۳۲	–	کنترل نشده
۰٫۰۱۱	$1{,}16 \times 10^3$	$1{,}69 \times 10^3$	$2{,}07 \times 10^3$	$5{,}17 \times 10^4$	۰٫۰۱۷	۱۱٫۶۵	۱٫۱۳۵	۰٫۲۹۷	$\eta = 1 \times 10^2$	با کنترل
۰٫۰۴۶	$6{,}0 \times 10^3$	$6{,}4 \times 10^3$	$8{,}6 \times 10^3$	$4{,}5 \times 10^4$	۰٫۰۱۲۴	۱۰٫۹	۰٫۸۸	۰٫۲۳	$\eta = 5 \times 10^2$	متمرکز و
۰٫۰۷۹	$7{,}2 \times 10^3$	$1{,}10 \times 10^4$	$1{,}47 \times 10^4$	$4{,}23 \times 10^4$	۰٫۰۱۰۲	۱۰٫۵۰	۰٫۷۱	۰٫۱۹۵	$\eta = 1 \times 10^3$	غیرمتمرکز
۰٫۲۹	$1{,}7 \times 10^4$	$3{,}4 \times 10^4$	$5{,}37 \times 10^4$	$2{,}78 \times 10^4$	۰٫۰۰۶۲	۱۰٫۹۳	۰٫۵۶	۰٫۰۹۹	$\eta = 5 \times 10^3$	$\rho = o$
۰٫۴۲	$2{,}26 \times 10^4$	$4{,}8 \times 10^4$	$7{,}58 \times 10^4$	$1{,}97 \times 10^4$	۰٫۰۰۴۴	۱۰٫۵۰	۰٫۴۰	۰٫۰۶۴	$\eta = 1 \times 10^4$	

جدول ۲. نتایج تقریباً یکسان کنترل متمرکز و نامتمرکز که برای ساختمان ۲۵ طبقه در حالت سه‌بعدی؛ بدون خروج از مرکزیت با $\eta = 1 \times 10^3$ و مقادیر گوناگون ρ و تعداد سه زیر سیستم.

$\frac{U_{max}}{W_t}$	بیشینه نیروی کنترل U ۳ (kN)	بیشینه نیروی کنترل U۲ (kN)	بیشینه نیروی کنترل U ۱ (kN)	بیشینه برش (kN)	بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقه‌یی (m)	بیشینه شتاب مطلق (m/s^2)	بیشینه سرعت نسبی (m/s)	بیشینه جابه‌جایی نسبی (m)	ضریب مقیاس η	وضعیت کنترل
–	–	–	–	$۵٫۵ \times ۱۰^۴$	۰٫۰۱۹	۱۲٫۰۶	۱٫۲۱	۰٫۳۲	–	کنترل نشده
۰٫۰۷۷	$۰٫۶۸ \times ۱۰^۴$	$۱٫۰۸ \times ۱۰^۴$	$۱٫۴۳ \times ۱۰^۴$	$۴٫۱۰ \times ۱۰^۴$	۰٫۰۰۹۷	۱۰٫۴۶	۰٫۷۴	۰٫۱۸۶	$\rho = 1$	باکنترل متمرکز و غیرمتمرکز
۰٫۰۷۸	$۰٫۶۸ \times ۱۰^۴$	$۱٫۰۹ \times ۱۰^۴$	$۱٫۴۴ \times ۱۰^۴$	$۴٫۱۶ \times ۱۰^۴$	۰٫۰۰۹۹	۱۰٫۴۶	۰٫۷۳	۰٫۱۹	$\rho = 0.6$	
۰٫۰۷۸۹	$۰٫۷۰۳ \times ۱۰^۴$	$۱٫۱۰ \times ۱۰^۴$	$۱٫۴۶ \times ۱۰^۴$	$۴٫۱۸ \times ۱۰^۴$	۰٫۰۱۰۱	۱۰٫۴۸	۰٫۷۲	۰٫۱۹۲	$\rho = 0.3$	
۰٫۰۷۹	$۰٫۷۲ \times ۱۰^۴$	$۱٫۱ \times ۱۰^۴$	$۱٫۴۷ \times ۱۰^۴$	$۴٫۲۳ \times ۱۰^۴$	۰٫۰۱۰۲	۱۰٫۵۰	۰٫۷۱	۰٫۱۹۵	$\rho = 0$	
۰٫۰۸۰	$۰٫۷۵ \times ۱۰^۴$	$۱٫۱۵ \times ۱۰^۴$	$۱٫۴۹ \times ۱۰^۴$	$۴٫۲۶ \times ۱۰^۴$	۰٫۰۱۰۴	۱۰٫۴۶	۰٫۷۰	۰٫۱۹۸	$\rho = -0.3$	
۰٫۰۸۰	$۰٫۷۸ \times ۱۰^۴$	$۱٫۱۲ \times ۱۰^۴$	$۱٫۵۰ \times ۱۰^۴$	$۴٫۲۹ \times ۱۰^۴$	۰٫۰۱۰۶	۱۰٫۴۶	۰٫۷۰	۰٫۲۰	$\rho = -0.6$	

جدول ۳. نتایج کنترل نامتمرکز مدل‌های سازه‌یی سه‌بعدی ۲۵ طبقه، بدون خروج از مرکزیت با $\eta = 1 \times 10^3$ و $\rho = 1.0$ برای حالات مختلفی از تعداد زیرسیستم‌ها و تعداد طبقات.

بیشینه نیروی کنترل U۵ (kN)	بیشینه نیروی کنترل U۴ (kN)	بیشینه نیروی کنترل U ۳ (kN)	بیشینه نیروی کنترل U۲ (kN)	بیشینه نیروی کنترل U۱ (kN)	بیشینه برش (kN)	بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقه‌یی (m)	بیشینه سرعت نسبی (m/s^2)	بیشینه جابه‌جایی نسبی (m)	تعداد زیرسیستم‌ها و طبقات
–	–	$۰٫۶۸ \times ۱۰^۴$	$۱٫۰۸ \times ۱۰^۴$	$۱٫۴۳ \times ۱۰^۴$	$۴٫۱۰ \times ۱۰^۴$	۰٫۰۰۹۷	۰٫۷۴	۰٫۱۸۶	۱۰-۸-۷
–	–	$۰٫۶۹ \times ۱۰^۴$	$۰٫۹۵ \times ۱۰^۴$	$۱٫۴۳ \times ۱۰^۴$	$۴٫۱۰ \times ۱۰^۴$	۰٫۰۰۹۷	۰٫۷۴	۰٫۱۸۶	۱۵-۵-۵
–	–	$۰٫۹۵ \times ۱۰^۴$	$۱٫۲۴ \times ۱۰^۴$	$۱٫۴۳ \times ۱۰^۴$	$۴٫۱۰ \times ۱۰^۴$	۰٫۰۰۹۷	۰٫۷۴	۰٫۱۸۶	۵-۱۰-۱۰
$۰٫۶۹ \times ۱۰^۴$	$۰٫۹۵ \times ۱۰^۴$	$۱٫۱۰ \times ۱۰^۴$	$۱٫۲۴ \times ۱۰^۴$	$۱٫۴۳ \times ۱۰^۴$	$۴٫۱۰ \times ۱۰^۴$	۰٫۰۰۹۷	۰٫۷۴	۰٫۱۸۶	۵-۵-۵-۵-۵

دارای بازخورد سرعت ارائه شده است، به گونه‌یی که در کلیه حالت‌ها مقدار ρ برابر صفر و مقدار η نیز از 1×10^2 تا 1×10^4 متغیر است. در این جدول، بیشینه جابه‌جایی نسبی، سرعت نسبی، شتاب مطلق و جابه‌جایی نسبی طبقات نسبت به یکدیگر در بالاترین طبقه برای مقایسه حالت‌های کنترل سازه‌یی مختلف با یکدیگر آورده شده‌اند. در این حالت‌از تحلیل، هر یک از زیرسیستم‌ها به ترتیب از پایین به بالا دارای ۱۰، ۸ و ۷ طبقه و به عبارتی ۳۰، ۲۴ و ۲۱ درجه آزادی هستند. چنان که از این جدول استنباط می‌شود مقادیر جابه‌جایی سازه‌یی با افزایش η از 1×10^2 به 1×10^4 کاهش می‌یابد، به‌طوری که در $\eta = 1 \times 10^4$ مقدار جابه‌جایی ۲۰ درصدِ مقدار آن در حالت بدون کنترل است و مقدار سرعت و شتاب نیز هریک به میزان تقریباً ۳۳٪ و ۸۵٪ مقدار حالت بدون کنترل است. بیشینه نیروی برشی و نیروی کنترل هر زیرسازه مربوط به پایین‌ترین طبقه بوده و در زیرسیستم‌های پایین‌تر نیز نیروی کنترل بیشتری مورد نیاز است. بیشترین نیروی کنترل سازه‌ی اصلی در حالت کنترل متمرکز ($MaxU$) برابر نیروی کنترل بیشینه در زیرسیستم شماره ($MaxU_1$) و اکثراً در پایین‌ترین ترازها بوده و نسبت این نیرو به وزن کل سازه $\left(\frac{U_{\max}}{W_t}\right)$ به‌عنوان مشخصه‌یی برای عملی‌بودن اعمال نیروی کنترل بر سازه استفاده می‌شود. چنان که

از جدول ۱ می‌توان دید دو حالت $\eta = 5 \times 10^3$ و $\eta = 1 \times 10^4$ با وجود کاهش قابل توجه در مقدار جابه‌جایی، نیازمند اعمال نیروهای بسیار قوی به سازه‌اند که عملاً امکان‌پذیر نبوده و کاربردی نیستند.

در جدول ۲، نتایج کنترل سازه برای مقادیر مختلف ρ و $\eta = 1 \times 10^3$ ارائه شده است. مقدار ماتریس وزنی Q به دو مشخصه‌ی η و ρ وابسته است، و نتایج جدول ۲ بیان‌کننده‌ی تغییرات کاهشی مقادیر جابه‌جایی و سرعت به‌ازای مقادیر مختلف ρ از صفر تا ۱ است. بنابراین می‌توان گفت افزودن پارامتر جابه‌جایی در تعیین نیروهای کنترل در این سازه تأثیر مثبتی داشته است که البته با توجه به نتایج بررسی‌های انجام شده توسط رفویی و منجمی نژاد[۱۵و۱۶] در حالت مربوط به مدل‌های سازه‌یی دوبعدی، می‌توان این نکته را به سایر مدل‌های سازه‌یی نیز تعمیم داد.

در شکل ۵، جابه‌جایی طبقه‌ی آخر سازه برای زمان‌های مختلف در دو حالت بدون کنترل و با کنترل نشان داده شده است. جابه‌جایی در این طبقه به‌ازای $\eta = 1 \times 10^3$ کاهش چشمگیری پیدا کرده است. جدول ۳، نتایج کنترل نامتمرکز سازه در حالت سه‌بعدی برای $\eta = 1 \times 10^3$ و $\rho = 1.0$ برای زیرسازه‌های با

تعداد متغیر طبقات را ارائه کرده است. چنان که دیده می‌شود، بیشینه جابه‌جایی، سرعت، جابه‌جایی نسبی طبقه‌یی و نیروی برشی یکسان است. نیروی کنترل زیرسیستم‌های شماره ۱ هر چهار حالت نیز با یکدیگر یکسان است و صرفاً نیروی کنترل بیشینه‌ی زیرسیستم‌های بالاتر با یکدیگر متفاوت است که طبیعی است.

در ادامه، با فرض غیر یکسان بودن سختی مدل سازه‌یی در جهات x و y (با تعداد سه زیرسیستم)، سازه دارای خروج از مرکزیت‌های e_x و e_y خواهد بود. ورودی شتاب‌نگاشت زلزله در دو جهت x و y یکسان فرض شده است. نتایج تحلیل سازه برای حالت با خروج از مرکزیتِ برابر در دو جهت x و y و همچنین یکسان در کلیه طبقات در جدول ۴ ارائه شده‌اند، چنان که از نتایج حاصله دیده می‌شود، خروج از مرکزیت مستقیماً بر تلاش‌های جهات x و y تأثیر زیادی نداشته است. البته توجه به مختلف بودن سختی مدل سازه‌یی در جهات x و y که سبب ایجاد تغییر مکان‌های مختلف در این دو جهت شده، ضرورت می‌یابد.

در جدول ۵ نتایج مربوط به تلاش‌های پیچشی ارائه شده که در این حالت در سطر نخست، $\eta = ۰$ بوده و مقادیر در حالت بدون کنترل برای پیچش و با خروج از مرکزیت کم محاسبه شده‌اند. در حالت با کنترل برای $\eta = ۱ \times ۱۰^{۳}$ پیچش[۱۸] کاهش ناچیزی را نشان می‌دهد (کم‌تر از ۰٫۵٪)، ولی با افزایش η و ۱۰۰ برابر شدن آن میزان کاهش پیچش برابر حدوداً ۶۰ درصد شده و طبیعتاً برای کاهش پاسخ‌های پیچشی سازه ضروری است ضرایب η، تقریباً به نسبت سختی پیچشی به سختی برشی افزایش داده شوند و نباید ماتریس Q_r در محاسبه‌ی ماتریس Q، دارای مقدار وزنی یکسانی با Q_x و Q_y باشد.

مقایسه‌ی نتایج ارائه شده در جدول ۵ نشان می‌دهد که روال موجود بر نتایج حالت دوبعدی بر این راستا نیز حاکم بوده و با افزایش خروج از مرکزیت در طبقات، گشتاور کنترلی پیچشی و نیروهای کنترل در جهات متعامد مورد نیاز افزایش می‌یابد. چنان که ذکر شد، شیوه‌ی اعمال نیروهای کنترل پیچشی، با بهره‌گیری از عملگرهای دو جهت x و y بوده و طراح می‌تواند با توجه به فاصله‌ی مورد نظر برای عملگرها

جدول ۴. نتایج کنترل نامتمرکز در جهت y از مدل سازه‌یی ۲۵ طبقه با سه زیرسیستم برای $\rho = ۰$ با خروج از مرکزیت یکسان $e_x = e_y$ و سختی متفاوت در جهات x و y.

در جهت Y									
$\frac{U_{\max}}{W_t}$	بیشینه‌نیروی کنترل U۳ (kN)	بیشینه‌نیروی کنترل U۲ (kN)	بیشینه‌نیروی کنترل U۱ (kN)	بیشینه برش (kN)	بیشینه سرعت نسبی Vel. (m/s)	بیشینه جابه‌جایی نسبی Disp. (m)	نسبت سختی k_x/k_y	ضریب مقیاس η	خروج از مرکزیت
۰٫۰۷۸	$۷٫۲ \times ۱۰^{۳}$	$۱٫۱ \times ۱۰^{۴}$	$۱٫۴۷ \times ۱۰^{۴}$	$۴٫۲۳ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۷۴	۰٫۱۹۴	۱٫۰		
۰٫۰۷۴	$۷٫۳ \times ۱۰^{۳}$	$۱٫۰۷ \times ۱۰^{۴}$	$۱٫۳۹ \times ۱۰^{۴}$	$۴٫۴ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۷۱۸	۰٫۱۷۱	۱٫۲۰	۱×۱۰^{۳}	٪۰٫۵
۰٫۰۶۹	$۷٫۳۶ \times ۱۰^{۳}$	$۱٫۰۷ \times ۱۰^{۴}$	$۱٫۳ \times ۱۰^{۴}$	$۴٫۵ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۷۰۳	۰٫۱۵۳	۱٫۴۰		
۰٫۰۹۴	$۱٫۲۵ \times ۱۰^{۴}$	$۱٫۶ \times ۱۰^{۴}$	$۱٫۷۶ \times ۱۰^{۴}$	$۴٫۷ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۸۲	۰٫۱۷۹	۱٫۴۰	۱×۱۰^{۳}	٪۳
۰٫۰۱۲۸	$۱٫۹۷ \times ۱۰^{۴}$	$۲٫۰۷ \times ۱۰^{۴}$	$۲٫۴ \times ۱۰^{۴}$	$۶٫۰۶ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۹۳	۰٫۱۹۱	۱٫۴۰	۱×۱۰^{۳}	٪۹

جدول ۵. نتایج کنترل نامتمرکز به‌منظور پیچش از مدل سازه‌یی ۲۵ طبقه با سه زیرسیستم برای $\rho = ۰$ و مقادیر متفاوت η در حالت $e_x = e_y$.

بیشینه نیروی کنترل U۳ (kN.m)	بیشینه‌نیروی کنترل U۲ (kN.m)	بیشینه‌نیروی کنترل U۱ (kN.m)	بیشینه پیچش (kN.m)	بیشینه دوران نسبی (rad)	نسبت سختی k_y/k_x	ضریب مقیاس η	خروج از مرکزیت
–	–	–	$۳٫۹ \times ۱۰^{۵}$	۰٫۰۵۵	۱٫۰	۰	
$۵٫۵ \times ۱۰^{۳}$	$۳٫۶۵ \times ۱۰^{۳}$	$۶٫۱۰ \times ۱۰^{۳}$	$۳٫۸۵ \times ۱۰^{۵}$	۰٫۰۵۳	۱٫۰	۱×۱۰^{۳}	
$۱٫۳۳ \times ۱۰^{۵}$	$۲٫۵۴ \times ۱۰^{۵}$	$۳٫۱ \times ۱۰^{۵}$	$۱٫۶۳ \times ۱۰^{۵}$	۰٫۰۱۹	۱٫۰		٪۰٫۵
$۱٫۳۶ \times ۱۰^{۵}$	$۲٫۵۷ \times ۱۰^{۵}$	$۳٫۱ \times ۱۰^{۵}$	$۱٫۷۹ \times ۱۰^{۵}$	۰٫۰۱۸۳	۱٫۲۰	۱×۱۰^{۵}	
$۱٫۴۰ \times ۱۰^{۵}$	$۲٫۶ \times ۱۰^{۵}$	$۳٫۱ \times ۱۰^{۵}$	$۱٫۹۵ \times ۱۰^{۵}$	۰٫۰۱۷۸	۱٫۴۰		
–	–	–	$۷٫۱۷ \times ۱۰^{۶}$	۰٫۲۸۸	۱٫۰	۰	
۱×۱۰^{۵}	$۵٫۵ \times ۱۰^{۴}$	۴×۱۰^{۴}	$۷٫۰ \times ۱۰^{۶}$	۰٫۲۷۳	۱٫۰	۱×۱۰^{۳}	٪۳
$۱٫۳۰ \times ۱۰^{۶}$	$۲٫۰۴ \times ۱۰^{۶}$	$۲٫۶۳ \times ۱۰^{۶}$	$۴٫۷۱ \times ۱۰^{۶}$	۰٫۰۹	۱٫۴۰	۱×۱۰^{۵}	
$۴٫۴ \times ۱۰^{۶}$	$۴٫۶ \times ۱۰^{۶}$	$۳٫۸ \times ۱۰^{۶}$	$۳٫۶ \times ۱۰^{۶}$	۰٫۰۸	۱٫۴	۱×۱۰^{۵}	٪۹

نسبت به تبدیل نیروی کنترل پیچشی به نیروی کنترلی در یک یا دو جهت x و y به‌صورت منفی و مثبت اقدام کند.

در جدول ۶ نتایج کنترل نامتمرکز برای بهینه‌کردن مقادیر η در هریک از زیرسازه‌ها ارائه شده است. برای سازه‌های دارای n زیرسازه، شیوه‌ی مرسوم و رایج می‌تواند برابر درنظر گرفتن ηها باشد، به‌طوری که $\eta_{۱} = ... = \eta_{m-۱} = \eta_m$؛ در این حالت میزان مقاومت افزایش یافته در تمامیِ طبقات به‌صورت یکسان فرض می‌شود. حال آن که در طبقات بالا مقدار نیروی کنترل اعمال شده بسیار بیشتر از مقاومت و سختی سازه بوده و در اکثر موارد اعمال نیروی کنترل ممکن نخواهد بود. با توجه به این که در یک سازه‌ی واقعی سختی از پایین به بالا کم می‌شود و $K_{۱} > K_{۲} > ... > K_n$ است، می‌توان فرض کرد که $\eta_{۱} < ... < \eta_m$. در جدول ۶ نتایج مربوط به این حالت مرتب شده است. چنان که مشاهده می‌شود، در زیرسازه‌های پایین به نیروی کنترل بیشتری در مقایسه با زیرسازه‌های بالایی نیاز داریم، و به‌ویژه در سازه‌های نامتقارن برای کاهش مقادیر پیچش‌های سازه‌یی، اعمال نیروهای کنترل بیشتر ضرورت می‌یابد.

باید توجه داشت که در سیستم‌های کنترلیِ بزرگ احتمال کارکردِ ضعیف، یا به‌طور کلی از کار افتادن قسمتی از کنترل‌کننده‌ها یا یک یا چند زیرسیستم وجود دارد؛ در این خصوص حتماً باید پیش‌بینی‌های لازم صورت پذیرد. جدول ۷ نتایج کنترل نامتمرکز را برای بازخورد سرعت با پارامترهای کنترلی $\eta = ۵ \times ۱۰^{۳}$ و $\eta = ۵ \times ۱۰^{۴}$ ارائه شده است.

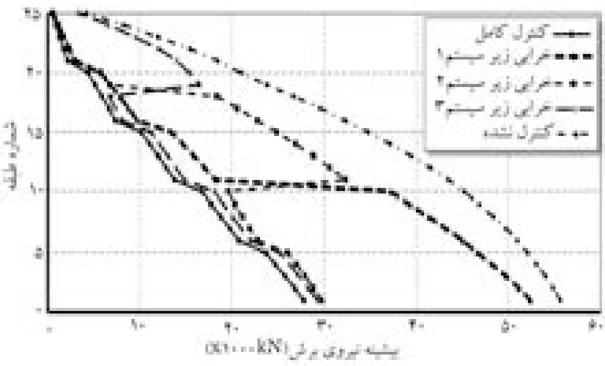
در این جدول نتایج کنترل برای حالت از کار افتادن یکی از زیرسیستم‌های شماره ۱ تا ۳ نیز ارائه شده است. مشخصه‌ی $\sum |U_{i\,\max}|$ جمع قدر مطلق نیروهای کنترل بیشینه‌ی طبقات است و نشان می‌دهد که در صورت از کار افتادن کنترل در زیرسیستم شماره ۱، کارآیی کنترل به شدت افت می‌کند.

جدول ۶. نتایج کنترل نامتمرکز برای نیروهای کنترل در هریک از زیرسازه‌ها با ضرایب متفاوت η در آن‌ها، برای مدل سازه‌یی ۲۵ طبقه با سه زیرسیستم.

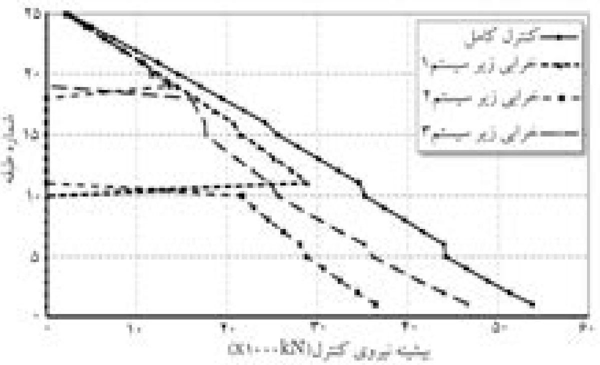
گشتاور پیچش کنترل				نیروهای کنترل در جهت X و Y $K_x = K_y$				٪۳ =خروج از مرکزیت ضریب مقیاس		
بیشینه‌گشتاور کنترل U۳ (kN.m)	بیشینه‌گشتاور کنترل U۲ (kN.m)	بیشینه‌کشتاور کنترل U۱ (kN.m)	بیشینه دوران نسبی Rot. (rad)	بیشینه‌نیروی کنترل U۳ (kN)	بیشینه‌نیروی کنترل U۲ (kN)	بیشینه‌نیروی کنترل U۱ (kN)	بیشینه جابه‌جایی نسبی Disp. (m)	$\eta_{۳}$ $\times ۱۰^{۳}$ $\times ۱۰^{۳}$	$\eta_{۱}$ $\times ۱۰^{۳}$ $\times ۱۰^{۳}$	$\eta_{۱}$ $\times ۱۰^{۳}$ $\times ۱۰^{۳}$
$۱٫۰ \times ۱۰^{۵}$	$۵٫۵ \times ۱۰^{۵}$	$۴٫۰ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۲۷۳	$۱٫۰۶ \times ۱۰^{۴}$	$۱٫۴۹ \times ۱۰^{۴}$	$۱٫۸۱ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۲۲	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰
$۱٫۰۶ \times ۱۰^{۵}$	$۱٫۰۷ \times ۱۰^{۵}$	$۲٫۰ \times ۱۰^{۵}$	۰٫۲۶۸	$۱٫۶۵ \times ۱۰^{۴}$	$۱٫۷۳ \times ۱۰^{۴}$	$۲٫۹ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۱۴	۱٫۰	۲٫۰	۳٫۰
$۱٫۰۵ \times ۱۰^{۵}$	$۱٫۵۶ \times ۱۰^{۵}$	$۶٫۱۱ \times ۱۰^{۵}$	۰٫۲۵۸	$۱٫۹ \times ۱۰^{۴}$	$۲٫۴۵ \times ۱۰^{۴}$	$۴٫۷ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۱۱	۱٫۰	۳٫۰	۶٫۰
$۱٫۰۳ \times ۱۰^{۵}$	$۲٫۵۲ \times ۱۰^{۵}$	$۱۳٫۲ \times ۱۰^{۵}$	۰٫۲۴	$۲٫۲۲ \times ۱۰^{۴}$	$۳٫۲۵ \times ۱۰^{۴}$	$۶٫۳۵ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۰۹۵	۱٫۰	۵٫۰	۱۰٫۰
$۴٫۳۳ \times ۱۰^{۵}$	$۱۴٫۴ \times ۱۰^{۵}$	$۴۳٫۰ \times ۱۰^{۵}$	۰٫۱۲	$۴٫۴۵ \times ۱۰^{۴}$	$۸٫۱ \times ۱۰^{۴}$	$۱۳٫۶ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۰۱۴	۱٫۰	۵٫۰	۱۰۰٫۰

جدول ۷. نتایج کنترل نامتمرکز با بازخورد سرعت در مدل سازه‌یی ۲۵ طبقه با سه زیرسیستم در حالتی که سیستم کنترلی در یکی از زیرسازه‌ها از کار بیفتد ($\rho = ۰$ و $e_x = e_y = ۰$).

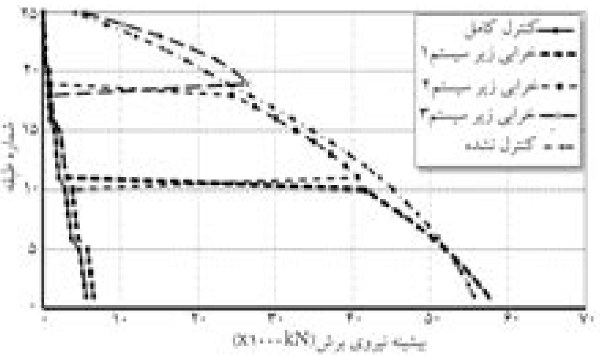
$\sum_{i=۱}^{n} \|U_{i\,\max}\|$ (kN)	بیسشینه‌نیروی کنترل U۳ (kN)	بیشینه‌نیروی کنترل U۲ (kN)	بیشینه‌نیروی کنترل U۱ (kN)	بیشینه برش (kN)	بیشینه‌جابه‌جایی نسبی طبقه‌یی (m)	بیشینه سرعت نسبی (m/s)	بیشینه جابه‌جایی نسبی (m)	ضریب مقیاس $\eta_{۳}$ $\times ۱۰^{۳}$	$\eta_{۲}$ $\times ۱۰^{۳}$	$\eta_{۱}$ $\times ۱۰^{۳}$	وضعیت کنترل
–	–	–	–	$۵٫۵۶ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۰۲۰۵	۱٫۲۱	۰٫۳۲	–	–	–	کنترل نشده
$۷٫۰ \times ۱۰^{۴}$	$۱٫۶۹ \times ۱۰^{۴}$	$۳٫۴۶ \times ۱۰^{۴}$	$۵٫۳۷ \times ۱۰^{۴}$	$۲٫۷۸ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۰۰۶۲	۰٫۵۶۰	۰٫۰۹۹	۵	۵	۵	کنترل متمرکز با $\rho = ۰$
$۲٫۳۸ \times ۱۰^{۵}$	$۱٫۴۵ \times ۱۰^{۴}$	$۲٫۸۹ \times ۱۰^{۴}$	۰	$۵٫۲۴ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۰۱۲۵	۰٫۶۹۸	۰٫۱۵۹	۵	۵	–	
$۳٫۱۳ \times ۱۰^{۵}$	$۱٫۳۶ \times ۱۰^{۴}$	۰	$۳/۶۴ \times ۱۰^{۴}$	$۳٫۲۳ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۰۱۲۶	۰٫۷۰۵	۰٫۱۵۸	۵	–	۵	
$۴٫۶۴ \times ۱۰^{۵}$	۰	$۲٫۴۷ \times ۱۰^{۴}$	$۴٫۶۶ \times ۱۰^{۴}$	$۲٫۹۲ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۰۱۵۶	۰٫۹۰۷	۰٫۱۳۷	–	۵	۵	
$۱۶٫۵ \times ۱۰^{۵}$	$۳٫۵۶ \times ۱۰^{۴}$	$۷٫۶۴ \times ۱۰^{۴}$	$۱۲٫۸ \times ۱۰^{۴}$	$۰٫۵۶ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۰۰۱۲	۰٫۱۳۲	۰٫۰۱۶۵	۵۰	۵۰	۵۰	
$۳٫۲ \times ۱۰^{۵}$	$۲٫۳۱ \times ۱۰^{۴}$	$۴٫۰۲ \times ۱۰^{۴}$	۰	$۵٫۷۵ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۰۱۴	۰٫۷۳	۰٫۱۳	۵۰	۵۰	–	
$۶٫۱ \times ۱۰^{۵}$	$۲٫۱۳ \times ۱۰^{۴}$	۰	$۶٫۳ \times ۱۰^{۴}$	$۴٫۰۷ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۰۱۷	۰٫۸۰	۰٫۱۲۴	۵۰	–	۵۰	
$۱۰٫۸ \times ۱۰^{۵}$	۰	$۵٫۴۲ \times ۱۰^{۴}$	$۹٫۷ \times ۱۰^{۴}$	$۲٫۶۵ \times ۱۰^{۴}$	۰٫۰۲۵	۱٫۰۷	۰٫۱۱۷	–	۵۰	۵۰	



شکل ۶. توزیع نیروی برشی بیشینه‌ی طبقات مدل سازه‌یی دارای سه زیرسیستم؛ در حالتی که سیستم کنترلی یکی از زیرسازه‌ها از کار بیفتد در حالات بدون کنترل و کنترل کامل با پارامترهای $\eta = 5 \times 10^{3}$، $\rho = 0$ و $e_x = e_y = 0$.

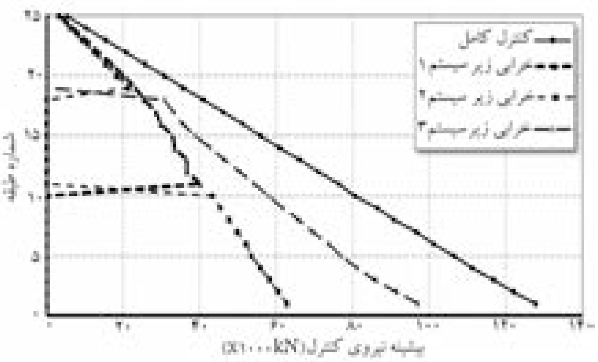


شکل ۷. توزیع نیروی کنترلی بیشینه طبقات مدل سازه‌یی دارای سه زیرسیستم؛ در حالتی که سیستم کنترلی یکی از زیرسازه‌ها از کار بیفتد در حالات بدون کنترل و کنترل کامل با پارامترهای $\eta = 5 \times 10^{3}$، $\rho = 0$ و $e_x = e_y = 0$.



شکل ۸. توزیع نیروی برشی بیشینه در طبقات مدل سازه‌یی دارای سه زیرسیستم، در حالتی که سیستم کنترلی یکی از زیرسازه‌ها از کار بیفتد و حالات بدون کنترل و کنترل کامل با پارامترهای $\eta = 5 \times 10^{4}$، $\rho = 0$ و $e_x = e_y = 0$.

چنان که مشاهده می‌شود، اگر یکی از زیرسیستم‌های شماره ۱ تا ۳ از کار بیفتد پاسخ‌های سازه‌یی تشدید خواهد شد، و حتی امکان دارد مقادیر پاسخ‌ها از حالت بدون کنترل نیز فراتر رود. البته میزان تشدید وابسته به محل زیرسیستم‌ها یا مقدار کنترلِ اعمال‌شده خواهد بود. با بررسی نتایج ارائه شده در جدول ۷ می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین صدمه و آسیب با ازکارافتادن زیرسیستم‌های پایین‌تر به سازه وارد



شکل ۹. توزیع نیروی کنترلی بیشینه در طبقات مدل سازه‌یی دارای سه زیرسیستم، در حالتی که سیستم کنترلی یکی از زیرسازه‌ها از کار بیفتد و حالات بدون کنترل و کنترل کامل با پارامترهای $\eta = 5 \times 10^{4}$، $\rho = 0$ و $e_x = e_y = 0$.

می‌شود و هرقدر میزان کنترل اعمال‌شده به سازه بیشتر باشد آسیب بیشتر خواهد بود.

شکل‌های ۶ و ۸ نشان‌دهنده‌ی تغییرات نیروی برشی بیشینه در طبقات برای دو حالت تعریف‌شده در زیرسیستم‌ها هستند. چنان که مشاهده می‌شود در زیرسیستم‌هایی که از کار افتاده‌اند، نیروی برشی به‌شدت افزایش یافته و حتی در برخی موارد بیش از نیروی برشی در حالت بدون کنترل شده است.

در شکل‌های ۷ و ۹ نیز تغییرات بیشینه‌ی نیروی کنترل اعمالی در طبقات نمایش داده شده است. نیروی کنترل در زیرسیستم‌هایی که سیستم کنترل در آن‌ها از کار افتاده برابر صفر است. این امر تأثیری مضاعف بر مقادیر نیروی کنترلی در سایر زیرسیستم‌ها داشته و سبب کاهش مقادیر آن‌ها شده است.

۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه نسبت به ارائه‌ی الگوریتم‌هایی برای کنترل نامتمرکز مدل‌های سه‌بعدی سازه‌های بلند برشی اقدام شد. عملکرد الگوریتم‌های ارائه‌شده با مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از حل چند مثال عددی کاملاً محدود به‌لحاظ تعداد مدل‌های سازه‌یی و نیز رکوردهای زلزله مورد استفاده بوده و مقایسه‌ی آن‌ها با حالت متمرکز مورد بررسی قرار گرفت. الگوریتم‌های پیشنهادی مبتنی بر حل مستقیم هر زیرسیستم سازه‌یی است، و اثرات ناشی از عدم کارکرد سیستم‌های کنترل هر زیرسازه بر رفتار کلی سازه مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی‌های عددی مشخص شد که نتایج حالت مربوط به کنترل نامتمرکز در زیرسازه‌ها بسیار نزدیک به نتایج مربوط به حالت کنترل متمرکز است. در مدل‌های سازه‌یی سه‌بعدی، دو درجه آزادی انتقالی x و y و یک درجه آزادی دورانی برای هر کف در نظر گرفته شده است. مطالعات انجام شده نشانگر آن است که در کنترل نامتمرکز مدل‌های سازه‌یی در نظر گرفته شده، تغییر تعداد طبقات هر زیرسیستم و تعداد زیرسیستم‌ها تفاوت چندانی در نتایج حاصله ایجاد نمی‌کند. همچنین دیده شد که در حالت کنترل با بازخورد جابه‌جایی و سرعت و تغییرات مثبت ρ، مقدار جابه‌جایی و نیز جابه‌جایی نسبیِ طبقه‌یی (با مقدار نیروی کنترل کم‌تر) کاهش بیشتری می‌یابد.

علاوه بر آن مشخص شد که در صورت وجود خروج از مرکزیت در طبقات باید از نیروی کنترل بیشتری برای کنترل حرکت‌های پیچشی سازه استفاده کرد. درخصوص نیروی کنترل مربوط به هر زیرسازه نیز با توجه به نتایج به‌دست آمده در این مطالعه‌ی

موردی، می‌توان با استفاده از توزیع خطی نیروی کنترل (نیروی کنترل کم‌تر در طبقات بالاتر) کارآیی الگوریتم کنترل پیشنهادی را افزایش داد. یادآور می‌شود که در تمامی حالات، برای تأمین پایداری الگوریتم‌های کنترل از تابع لیاپانوف در تعیین تابع وزنی Q استفاده شده است، اگرچه این امر ممکن است منجر به کم‌ترین نیروهای کنترل مورد نیاز نشود. نتایج به‌دست آمده در حالاتی که یکی از زیرسیستم‌ها از کار بیفتد، نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب سیستم کنترل نامتمرکز درکنترل پاسخ سیستم هرچند با نیروی کنترل بیشتر است. یکی از مزایای اصلی نامتمرکز کردن سیستم کنترل در سازه، بالارفتن قابلیت اعتماد آن بوده، به‌طوری که درصورت از کار افتادن سیستم کنترل یکی از زیرسازه‌ها یا همه‌ی زیرسیستم‌ها به‌نحو لازم کنترل می‌شوند. بررسی بیشینه نیروهای برشی طبقات و بیشینه نیروی کنترل اعمالی نشان می‌دهد در حالتی که یکی از زیرسیستم‌های کنترل دچار خرابی و خاموشی شود، نیروی برشی در آن زیرسیستم افزایش می‌یابد و کارآیی الگوریتم کنترل به‌طور کلی کاهش می‌یابد.

پانوشت

1. optimal classical control
2. instantaneous optimal control
3. pole assignment
4. sliding mode control
5. decentralized control
6. time delay
7. Switching super-plane
8. global reaching law
9. reference adaptive control theory model
10. gain matrix
11. sliding mode
12. reaching law
13. instantaneous optimal control
14. active tendons
15. active variable stiffness
16. active viscous damper
17. actuator
18. rotation

منابع

1. Yao, J.T.P. "Concept of structural control", *Journal of Structural Engineering, ASCE,* **98**(7), pp. 1567-1574 (1972).
2. Yang, J.N. and Li, Z. "Instantaneous optimal control for linear, nonlinear and hysteretic structure-stable controllers", Technical Report NCEER-91-0026 (1991).
3. Ghaboussi, J. "Some applications of neural networks in structural engineering", *Proceedings, Structures Cong. 94 ASCE,* Atlanta, GA. (1994).
4. Soong, T.T. "Active structural control: Theory & practice", *Longman Scientific & Technical,* England (1990).
5. Jabbari, F.; Schmitendorf, W.E. and Yang, J.N. "H_∞ control for seismic-excited buildings with acceleration feedback", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE,* (Sep. 1995).
6. Rofooei, F.R. and Tadjbakhsh, I.G. "Optimal control of structures with acceleration, velocity and displacement feedback", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE,* **119**(10), (Oct. 1993).
7. Siljak, D.D. Vukcevic, M.B. "Decentralization, stabilization and estimation of large-scale linear systems", *IEEE Transactions on Automatic Control, AC.,* **21**, pp. 363-366 (1975).
8. Savastuk, S.V. and Siljak, E.D. "Optimal decentralized contro", *Proc. Of American Control Conference,* Baltimore, Maryland (June 1994)
9. Wang, S.H. and Davison, E.J. "On the stabilization of decentralized control systems", *IEEE Trans. Autom. Control,* **18**, p. 473 (1973).
10. Yang, J.N.; Wu, J.C. and Agrawal, J. "Sliding mode control for nonlinear and hysteretic structures", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE,* **121**(12), (Dec 1995).
11. Ryaciotaki-boossalis, H.A. "The use of decentralized control on the vibration suppression in large flexible dynamic systems", Maple Press (1988).
12. Dix, P.; Ozguner, U. and Gordon, R.W. "Decentralized control experiments on a truss structure", *Proc. of the 29th Conf. On Decision and Control,* Honolulu, Hawaii, (Dec. 1990).
13. Williams, T. and Xu, J. "Closed -loop grammians of flexible space structures", *Proc. of the 33rd Conf. On Decision and Control,* Lake Buena Vista, FL, (Dec 1994).
14. Hino, M.; Lwal, Z.; Mizumoto, L. and Kohzawa, R. "Active vibration control of a multi-degree-of-freedom structure by the use of robust decentralized simple aaptive control", *Proc. of the 1996 IEEE International Conf. On Control Applications,* Dearborn, Mi, (Sep. 1996).
15. Rofooei, F.R. and Monajemi-Nezhad, S. "Decentralized control of tall building", *Journal of Structural Design of Tall and Special Buildings,* **15**(2), pp. 153-170 (2005).
16. Monajemi-Nezhad, S. and Rofooei, F.R. "Decentralized sliding mode control of multistory buildings", *Journal of Structural Design of Tall and Special Buildings,* **16**, pp. 181-204 (2007).