



## کنترل غیرمتمرکز سازه‌های ساختمانی برشی بلند در برابر گسیختگی سنسورها و عدم قطعیت در تحریکات زلزله

رویا راجی<sup>۱</sup>، حسین غفارزاده<sup>۲\*</sup>، علی حدیدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۳-۲۴

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۵-۱۵

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۶-۱۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۶-۲۳

### کلمات کلیدی:

کنترل فعال

کنترل غیرمتمرکز

گسیختگی سنسور

عدم قطعیت

تحریکات زلزله

**خلاصه:** این مقاله از کنترلر مقاوم  $H^\infty$  با فیدبک استاتیکی خروجی و تئوری نامساوی‌های ماتریسی خطی (LMI) و نیز تعدادی تغییرات در متغیرهای LMI برای مقاوم سازی سازه‌های ساختمانی برشی در مقابل انواع عدم قطعیت‌ها و نیز نیروهای دینامیکی زلزله و باد استفاده می‌کند. برای حفظ عملکرد کل سیستم با وجود از کار افتادن کنترلر مرکزی، جلوگیری از جابه جایی حجم زیادی از داده‌ها بین سنسورها و کنترلر و نیز مسائل اقتصادی، بحث جایگزینی روش کنترل متمرکز با کنترل غیر متمرکز در انواع مختلف شامل کنترل کاملاً غیرمتمرکز و کنترل غیرمتمرکز جزئی درگیر و غیردرگیر مورد مطالعه قرار می‌گیرد و سپس میزان مقاومت روش مذکور هم در کنترل متمرکز و هم در کنترل‌های غیرمتمرکز در برابر نیروهای دینامیکی مانند زلزله، عدم قطعیت در تحریکات زلزله و شکست سنسورها ارزیابی می‌شود و با یکدیگر مقایسه می‌شود. در نهایت پاسخ‌های حاصل از الگوریتم کنترلی مورد استفاده با نتایج حاصل از کنترل رگولاتور درجه دوم خطی (LQR) مقایسه می‌شود. برای این ارزیابی دو مثال عددی حل شده‌است. یک سازه‌ی برشی ۵ طبقه و یک سازه‌ی برشی ۲۰ طبقه. بر اساس نتایج، الگوریتم مذکور کاملاً در برابر گسیختگی سنسورها مقاوم است، همچنین کنترلرهای غیرمتمرکز نتایج بسیار نزدیکی به کنترلر متمرکز دارند. عدم قطعیت تحریکات زلزله تغییراتی در پاسخ‌ها ایجاد می‌کند ولی باز هم پاسخ‌های کنترل شده به طور قابل توجهی کمتر از پاسخ‌های کنترل نشده هستند. لازم به ذکر است که روش مورد استفاده پاسخ‌ها را به صورت قابل ملاحظه‌ای کمتر از روش کنترلی LQR کاهش می‌دهد.

### ۱- مقدمه

دامنه ارتعاشات مکانیکی، از چندین سانتی‌متر در مهندسی عمران تا چندین نانومتر در مهندسی ابزار دقیق تغییر می‌کند. اثرات زیان بار این ارتعاشات روی سیستم‌ها، شامل گسیختگی، از بین رفتن آسایش و تاثیر منفی بر روی عملکرد ابزار دقیق است. گسیختگی سازه‌ای ناشی از ارتعاش، ممکن است به خاطر تغییر شکل بیش از حد سازه در اثر بارهای موقت مانند پاسخ سازه به زمین لرزه، ناپایداری ناشی از شرایط خاص مانند لرزش پل‌ها تحت اثرات باد و یا یک خستگی ساده ایجاد شود. صدای حاصل از هلیکوپترها و تاب خوردن ساختمان‌ها در اثر باد

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ghaffar@tabrizu.ac.ir

هم می‌توانند مثالهایی از صلب آسایش باشند.

برای این منظور مفاهیم جدید حفاظت سازه‌ها توسعه یافته‌است. در مفاهیم جدید، کاهش ارتعاشات با روش‌های مختلفی می‌تواند حاصل شود. رایج‌ترین آن‌ها سختی، میرایی و جداسازی پایه است. ازدیاد سختی، شامل افزایش فرکانس رزونانس سازه به بالاتر از محدوده فرکانس زلزله است. افزایش میرایی، شامل کاهش پیک رزونانس با اتلاف انرژی ارتعاش است و جداسازی پایه شامل جلوگیری از گسترش اختلالات به بخش‌های حساس سیستم‌ها است. چنانچه سطح عملکرد و کارایی بالاتری مد نظر باشد، روش کنترل فعال مطرح می‌شود.

در طول چندین قرن یکی از شاخه‌های دانش مهندسی که توجه



سیستم‌های مجهز به کنترلر غیر متمرکز، مشابه کنترلرهای متمرکز، نسبت به گسیختگی سنسورها و نیز محرک‌ها [۳۴] حساس هستند. این گسیختگی‌ها منجر به ایجاد اختلال در عملکرد کلی سیستم حلقه بسته می‌شود. در این حالت تنها تشخیص گسیختگی چاره ساز نیست بلکه بایستی برنامه‌ای اتخاذ شود که پایداری سیستم را با وجود وقوع گسیختگی حفظ نماید. این رویکرد کنترل تولرانس گسیختگی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. اصلی‌ترین هدف FTC تضمین عملکرد سیستم در مقابل گسیختگی‌ها است. رویکرد طراحی FTC به دو دسته تقسیم می‌شود: رویکرد غیرفعال و رویکرد فعال. در رویکرد FTC غیرفعال برای حفظ پایداری سیستم یک دستگاه متعادل کننده ثابت استفاده می‌شود. در حقیقت این روش برای حفظ پایداری سیستم از یک تکنیک کنترل مقاوم بدون نیاز به تشخیص گسیختگی و بازسازی ساختار سیستم استفاده می‌کند. بر خلاف روش غیر فعال FTC در روش فعال FTC در هنگام وقوع گسیختگی سیستم مانیتورینگ با اصلاح ساختار سازه یا اصلاح پارامترهای کنترلر فیدبک عمل می‌کند. از این رو با تعریف پارامترهای کنترلر جدید سیستم گسیخته عملکرد یک سیستم اسمی را پیدا می‌کند [۳۵-۳۹].

از آنجایی که تعدادی از تحریکات دینامیکی مانند بارهای زلزله و باد در هنگام وقوع نمی‌توانند اندازه‌گیری شوند، از این رو استفاده از روش‌هایی که در مقابل چنین عدم قطعیت‌هایی مقاوم باشند ضروری است [۴۰]. عدم قطعیت‌ها در دو گروه جای می‌گیرند. عدم قطعیت‌های پارامتریک و عدم قطعیت‌های غیرپارامتریک. عدم قطعیت‌های پارامتریک شامل حالت‌هایی هستند که در آنها مقادیر دقیق پارامترهای حقیقی مشخص نیستند اما عدم قطعیت‌های غیرپارامتریک هنگامی که غیرخطی‌ها و نیز دینامیک‌های سریع یک سیستم قابل تشخیص نباشد رخ می‌دهند. روش کنترل مقاوم از ویژگی‌های حقیقی حلقه کنترل برای تمامی برنامه‌های کنترل شده حفاظت می‌کند [۲۳، ۲۴، ۲۹، ۳۵، ۴۱-۴۵].

در این مقاله مقاومت کنترلر فیدبک مقاوم  $H_{\infty}$  با خروجی استاتیکی به همراه شرایط جدید نامساوی‌های ماتریسی خطی (LMI)<sup>۲</sup> جهت کنترل سازه‌های برشی با روش‌های کنترل متمرکز، کاملاً غیرمتمرکز و غیرمتمرکز جزئی در گیر و غیردر گیر در مقابل عدم قطعیت

و علاقه زیادی به آن معطوف شده‌است، کنترلر فیدبک فعال است. در سیستم کنترل سازه‌ای فیدبک جهت کاهش لرزه‌های نامطلوب در طول تحریکات دینامیکی مانند زلزله مجموعه‌ای از سنسورها، محرک‌ها و کنترلرها استفاده می‌شوند. به این صورت که در هنگام وقوع زلزله داده‌های پاسخ سازه‌ای توسط سنسورها دریافت می‌شود، سپس جهت تنظیم فرمان کنترل به کنترلرها فرستاده می‌شود. کنترلرها فرمان کنترل را به محرک‌ها صادر می‌کنند، محرک‌ها ممکن است در تمامی طبقات سازه‌ای و یا در برخی از آن‌ها کار گذاشته شده‌باشند. در نهایت این محرک‌ها هستند که نیروی کنترل را بر طبقات سازه‌ای وارد نموده، از پاسخ سازه می‌کاهند. وارد کردن نیروی کنترل به سازه ممکن است به صورت مستقیم انجام گیرد که در این صورت کنترل فعال نامیده می‌شود. در غیر این صورت، با وارد آمدن نیروی کنترل به طور غیرمستقیم، فرایند کنترل نام کنترل نیمه فعال را به خود می‌گیرد [۹-۱].

در روند این فرایند کنترل مشکلاتی وجود دارد. از جمله این که انتقال حجم زیاد داده‌ها بین سنسورها و کنترلرها کار دشواری است و ممکن است تعدادی از داده‌ها به درستی انتقال نیابند. مساله دوم این است که چنانچه کنترلر مرکزی دچار گسیختگی شود کل فرایند کنترل با شکست مواجه می‌شود و نیز مساله اقتصادی مساله‌ی سومی است که کنترل متمرکز [۱۰-۱۴] را دشوار می‌نماید. از این رو بحث کنترل غیرمتمرکز پیش می‌آید [۱۵، ۱۶]. در کنترل غیرمتمرکز طراحی و به‌کارگیری کنترلرها بسیار ساده‌تر می‌باشد. کنترل غیر متمرکز نیز به طرق مختلف می‌تواند انجام گیرد، کنترل کاملاً غیرمتمرکز، کنترل غیرمتمرکز جزئی درگیر و کنترل غیرمتمرکز جزئی غیردرگیر.

در یک سیستم با کنترل غیرمتمرکز یک سیستم سازه‌ای با مقیاس بزرگ به چندین زیرسازه تقسیم می‌شود. چنانچه در هر طبقه یک کنترلر وجود داشته‌باشد و آن کنترلر از داده‌های سنسورهای مربوط به همان طبقه استفاده نماید، روش کنترل، کنترل کاملاً غیرمتمرکز نامیده می‌شود ولی چنانچه کنترلر داده‌هایی را از سنسورهای طبقات دیگر و یا زیرسازه‌های دیگر دریافت نماید، کنترل غیرمتمرکز جزئی نامیده می‌شود. چنانچه طبقات زیرسازه‌ها با یکدیگر هم‌پوشانی نداشته‌باشند، روش کنترل غیرمتمرکز جزئی غیردرگیر خواهد بود ولی اگر بین طبقات زیرسازه‌ها هم‌پوشانی وجود داشته‌باشد، کنترل غیرمتمرکز جزئی درگیر است [۱۱، ۱۳، ۱۷-۳۳].

1 Fault tolerant control(FTC)

2 Linear matrix inequality

در تحریکات زلزله و نیز گسیختگی سنسورها ارزیابی می‌شود.

## ۲- کنترل فعال سازه‌ها

### ۲-۱- کنترلر فیدبک با خروجی استاتیکی و گسیختگی سنسورها

یک سیستم کنترل فعال از یک نیروی منبع قدرت خارجی یا نیروی هیدرولیکی یا محرک الکترومکانیکی ساخته شده‌است که یک نیروی از پیش تعیین شده را به سازه اعمال می‌کند. چنین نیروهایی می‌توانند برای جذب و یا هدر دادن انرژی استفاده شوند. عملکرد این سیستم بر پایه اطلاعات گیرنده‌های حساسی است که در طبقات نصب شده‌اند. این اطلاعات برای پردازش به پردازنده فرستاده می‌شوند. سپس، بر اساس یک الگوریتم کنترل از پیش تعیین شده، نیروی کنترل بهینه تعیین می‌شود. زمانی که دامنه اندازه‌گیری نوسانات برابر یا بیشتر از یک حد از پیش تعیین شده باشد، فرآیند کنترل شروع می‌شود. چنین رویکردی برای افزایش کارایی این روش در مقایسه با استراتژی‌های کنترل غیرفعال در نظر گرفته می‌شود. برای یک سازه با  $n$  درجه آزادی معادله حرکت سازه تحت تحریکات زلزله به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Bu(t) + E\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

در معادله (۱)  $\ddot{x}_g(t) \in R^m$  بردار شتاب زمین لرزه،  $x(t) \in R^n$  بردار نیروی کنترل و  $x(t) \in R^n$  بردار تغییر مکان طبقات نسبت به زمین هستند. مکان قرار گرفتن کنترلرها با ماتریس  $B \in R^{n \times r}$  ارائه شده است و  $E \in R^n$  بردار ضریب شتاب زمین لرزه است.  $M \in R^{n \times n}$ ،  $C \in R^{n \times n}$  و  $K \in R^{n \times n}$  ماتریس‌های جرم، میرایی رایلی و سختی هستند.  $r$  تعداد محرک‌های به کار رفته در سازه و  $m$  تعداد ورودی‌های شتاب زمین لرزه را نشان می‌دهد.

با فرض متغیرهای حالت به شکل  $X(t) = \{x(t) \dot{x}(t)\}^T$ ، فرم فضای حالت معادله (۱) به شکل زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= AX(t) + B_u u(t) + E_w \ddot{x}_g(t) \\ z(t) &= C_z X(t) + D_z u(t) \\ y(t) &= C_y X(t) \end{aligned} \quad (2)$$

در معادله (۲)،  $X(t) \in R^n$  بردار متغیر حالت و ماتریس‌های

$A \in R^{2n \times 2n}$  ماتریس سیستم،  $B_u \in R^{2n \times n}$  ماتریس ضریب نیروی کنترل و  $E_w \in R^{2n}$  بردار ضریب تحریکات خارجی هستند که در رابطه (۳) محاسبه شده‌اند.  $z(t)$  خروجی کنترل شده،  $C_z$  و  $D_z$  ماتریس‌های ثابت حقیقی با ابعاد مقتضی هستند.  $y(t) \in R^p$  خروجی مشاهده شده می‌باشد و  $C_y \in R^{p \times n}$ ،  $p < n$  یک ماتریس ثابت، مشخص و حقیقی است،  $p$  نیز تعداد خروجی‌ها را نشان می‌دهد.

$$A = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B_u = \begin{bmatrix} [0] \\ [M]^{-1}[B] \end{bmatrix}, E_w = \begin{bmatrix} \{0\} \\ [M]^{-1}\{E\} \end{bmatrix}$$

با در نظر گرفتن امکان گسیختگی سنسورها در سیستم کنترل و بر اساس تئوری کنترل فیدبک خروجی، نیروی کنترل،  $u(t)$ ، به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$u(t) = ky(t) = Fk_f y(t) \quad (4)$$

در معادله (۴)،  $k$  ماتریس بهره‌ی فیدبک استاتیکی خروجی می‌باشد، احتمال گسیختگی سنسورها با ماتریس  $F$  تعریف شده‌است و  $k_f$  ماتریس بهره‌ی کنترلر فیدبک تولرانس خطای سنسور می‌باشد که بعداً طراحی خواهد شد. اگر گسیختگی احتمالی در سنسورهای هر طبقه به عنوان  $f_i$  معرفی شود، به صورتی که  $i$  نشان دهنده‌ی شماره طبقه باشد، ماتریس گسیختگی سنسورها به فرم زیر تعریف خواهد شد:

$$F = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix} \quad (5)$$

در حالت کلی مولفه‌های ماتریس گسیختگی سنسورها در محدوده‌ی  $0 \leq f_{di} \leq f_i \leq f_{ui} \leq \infty$  قرار دارند که در آن  $f_{ui}$  و  $f_{di}$  حدود حقیقی هستند. اگر چنانچه  $f_{di} = f_{ui} = f_i = 0$  برقرار باشد به این معنی است که سنسورهای طبقه‌ی شماره  $i$  به طور کامل گسیخته شده‌اند، اگر  $f_{di} = f_{ui} = f_i = 1$  باشد به این معنی است که هیچ گسیختگی در سنسورهای طبقه‌ی شماره  $i$  رخ نداده‌است و در غیر این

### ۲-۳- کنترلر $H_\infty$ با روش نامساوی‌های ماتریسی غیرخطی

یک سیستم خطی با ماتریس سیستم  $A$  در صورتی پایدار خواهد بود که یک ماتریس قطعی مثبت مانند  $P (P > 0)$  وجود داشته باشد به طوری که نامساوی زیر (معروف به نامساوی لیاپانوف) برقرار باشد:

$$A^T P + P A < 0 \quad (12)$$

با استفاده از سیستم خطی معادله (۱۱) تابع انتقال به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$H(s) \triangleq C_z (sI - A_f)^{-1} E_w \quad (13)$$

در کنترلر متمرکز طراحی شده مقدار نرم تابع انتقال  $H_\infty$  تنها در صورتی از یک مقدار مشخص  $\gamma > 0$  کوچکتر خواهد بود که نامساوی ماتریسی زیر برقرار باشد:

$$\begin{bmatrix} A_f^T P + P A_f + C_f^T C_f & P E_w \\ E_w^T P & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (14)$$

وجود ماتریسی مانند  $P > 0$  که در شرایط معادله (۱۴) صدق کند معادل با وجود ماتریسی مانند  $Q \in R^{n \times n}, Q > 0$  است که در رابطه‌ی زیر صدق کند:

$$\begin{bmatrix} A_f^T Q + Q A_f + E_w E_w^T / \gamma^2 & Q C_f^T \\ C_f Q & -I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (15)$$

با قراردادن مقادیر ماتریس‌های  $A_f$  و  $C_f$  از معادله (۱۰) در معادله (۱۵)، معادله (۱۵) به شکل زیر درمی‌آید:

$$\begin{bmatrix} Q A^T + A Q + Q k_f^T F^T B_u^T + B_u F k_f Q + E_w E_w^T / \gamma^2 & Q C_z^T + Q k_f^T F^T D_z^T \\ C_z Q + D_z F k_f Q & -I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (16)$$

نامساوی معادله (۱۶) غیرخطی است، بنابراین برای تبدیل آن به یک مساله ی LMI بایستی متغیرهای جدیدی تعریف شوند. متغیر بهینه  $Y$  طوری تعریف می‌شود که رابطه ی  $k_f Q = Y$  برقرار شود. همچنین فرض می‌شود که  $\gamma^{-2} = \eta$  باشد. به این ترتیب معادله (۱۶) به فرم زیر تبدیل می‌شود:

صورت گسیختگی جزئی در سنسورهای مورد نظر رخ خواهد داد. آن‌گاه

$$f_{avi} = \frac{f_{di} + f_{ui}}{2}, l_i = \frac{f_i - f_{avi}}{f_{avi}} \quad (6)$$

$$L = \begin{bmatrix} l_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix}, F_{av} = \begin{bmatrix} f_{av1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_{av2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_{av3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$F = F_{av} (I + L)$$

اکنون با قرار دادن  $y(t) = C_y X(t)$  در معادله (۴) نیروی کنترل به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$u(t) = F k_f C_y X(t) \quad (8)$$

به این ترتیب معادله فضای حالت در معادله (۲) به فرم زیر تبدیل می‌شود:

$$\dot{X}(t) = A_f X(t) + E_w \dot{x}_g(t) \quad (9)$$

$$z(t) = C_f X(t)$$

که در آن

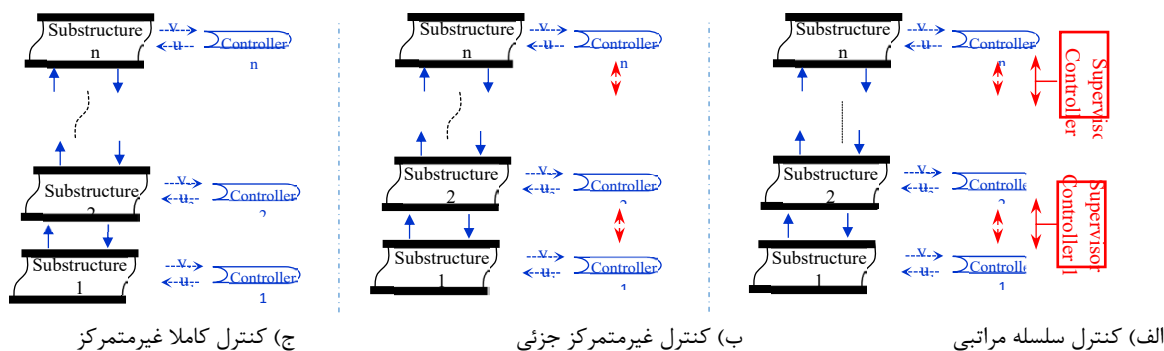
$$A_f = A + B_u F k_f C_y \quad (10)$$

$$C_f = C_z + D_z F k_f C_y$$

### ۲-۲- اثرات حرکات نامعین زمین

از آنجایی که برخی تحریکات مانند نیروهای زلزله و باد تحت شرایط واقعی نمی‌توانند تعیین شوند، عدم قطعیت پارامتریک به حساب می‌آیند و از این رو ارزیابی میزان مقاومت روش‌های کنترل مقاوم در برابر چنین عدم قطعیت‌هایی ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله از کنترلر مقاوم  $H_\infty$  با استفاده از نامساوی‌های ماتریسی غیرخطی برای کنترل متمرکز و غیرمتمرکز سازه‌ها استفاده شده است و مقاومت روش به کار رفته‌ی کنترل در مقابل عدم قطعیت شتاب زلزله در طبقه اول سنجیده شده است. با فرض عدم قطعیت در شتاب زلزله معادله (۹) به فرم زیر تبدیل می‌شود:

$$\dot{X}(t) = A_f X(t) + E_w (\dot{x}_g(t) + \Delta \ddot{x}_g(t)) \quad (11)$$



شکل ۱. ساختار کنترل غیرمتمرکز

Fig. 1. Configuration of the decentralized information: a) Hierarchical control, b) partial decentralized control, c) fully decentralized control

طبقات همان زیرسازه تعیین می‌شود، ولی در کنترلر غیرمتمرکز جزئی درگیر که بین زیرسازه‌ها هم‌پوشانی وجود دارد، نیروی کنترل هر طبقه بر اساس متغیرهای حالت آن طبقه و نیز طبقه‌های مجاور تعیین می‌شود. در کنترل غیرمتمرکز سلسله مراتبی یک لایه‌ی دیگری از اطلاعات عمودی وجود دارد که در کنار کنترلرهای محلی قرار می‌گیرد. در این مقاله کارایی کنترلرهای کاملاً غیرمتمرکز و غیرمتمرکز جزئی درگیر و غیردرگیر در مقایسه با کنترلر متمرکز ارزیابی شده‌است. جهت اعمال ساختار کنترل غیرمتمرکز به سیستم سازه‌ای از الگوی پراکندگی استفاده شده‌است. برای استفاده از الگوی پراکندگی نوع کنترلر غیرمتمرکز با اعمال ضرایب صفر و غیر صفر در سطرها و ستون‌های ماتریس بهره انجام می‌گیرد. برای ایجاد سهولت در ایجاد ساختار صفر و غیر صفر در ساختار ماتریس بهره بایستی متغیرهای جدیدی تعریف شوند. این متغیرها به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$Q = SQ_S S^T + RQ_R R^T, \quad Y = Y_R R^T \quad (19)$$

در معادله (۱۹)  $Q_S \in R^{(n-p) \times (n-p)}$  و  $Q_R \in R^{p \times p}$  ماتریس‌های متقارن هستند و  $Y_R$  ماتریسی با ابعاد  $p \times p$  است. ماتریس  $S \in R^{n \times (n-p)}$  هسته‌ی  $^1$  ماتریس  $C_y$  تعریف می‌شود و ماتریس  $R \in R^{n \times p}$  طبق رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$R = C_y^T (C_y C_y^T)^{-1} \quad (20)$$

در این مرحله متغیرهای معادله (۱۹) در رابطه‌ی LMI معادله (۱۷) جایگذاری می‌شوند و به این ترتیب رابطه LMI معادله (۱۷) به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} QA^T + AQ + Y^T F^T B_u^T + B_u^T F Y + E E_w^T \eta & QC_z^T + Y^T F^T D_z^T \\ C_z Q + D_z F Y & -I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (17)$$

به این ترتیب نامسای ماتریسی خطی برای طراحی کنترلر  $H_\infty$  با فرض عدم قطعیت در شتاب تحریکات زلزله و گسیختگی‌های سنسورها به شکل زیر فرمول بندی می‌شود:

$$\begin{cases} \text{maximize } \eta \\ \text{subject to } Q > 0, \eta > 0 \text{ and the LMI in Eq. (17)} \end{cases} \quad (18)$$

با حل مساله بهینه معادله (۱۸) مقدار بهینه  $\eta$  محاسبه می‌شود.

#### ۲-۴- کنترلر $H_\infty$ نامعین غیرمتمرکز

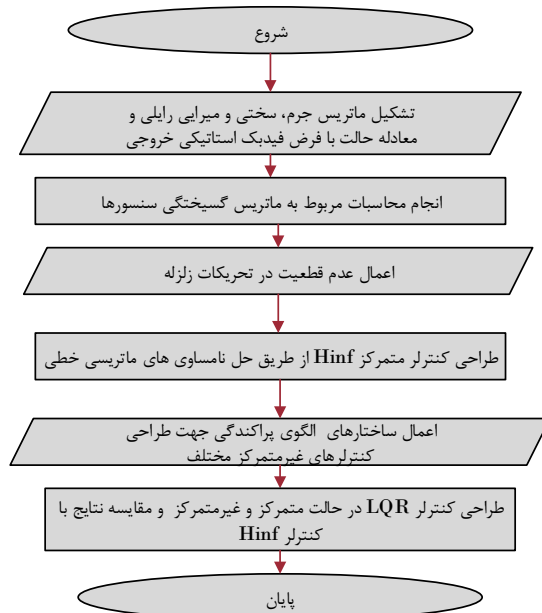
این مقاله مزیت‌های کنترلر غیرمتمرکز نسبت به کنترلر متمرکز و نیز میزان دقت آن را در تخمین پاسخ‌های سازه‌ای در حضور عدم قطعیت‌ها و گسیختگی‌ها ارزیابی می‌کند. در کنترلر متمرکز سیستم سازه‌ای و مقادیر نیروهای کنترل شامل کلیه برنامه‌های سیستم (اطلاعات قبل) و داده‌های حالت (اطلاعات بعد) بایستی کاملاً مشخص شوند، در حالی که در کنترل غیرمتمرکز کنترلرهای محلی فقط به بخشی از اطلاعات سازه‌ای نیاز دارند.

سه نوع کنترل غیرمتمرکز وجود دارد. کنترل کاملاً غیرمتمرکز، کنترل غیرمتمرکز جزئی و غیرمتمرکز سلسله مراتبی که در شکل (۱) نشان داده شده‌است. در کنترل کاملاً غیرمتمرکز هیچ انتقال داده‌ای بین کنترلرهای محلی انجام نمی‌گیرد ولی در کنترل غیرمتمرکز جزئی که به دو دسته درگیر و غیردرگیر تقسیم می‌شود، تبادل داده بین کنترلرهای محلی انجام می‌گیرد. در کنترل غیرمتمرکز جزئی غیردرگیر نیروی کنترل در هر طبقه از هر زیرسازه بر اساس متغیرهای حالت

جدول ۱. آرایش مناسب ماتریس‌های  $Q_R$  و  $Y_R$  جهت ایجاد کنترلرهای کاملاً غیرمتمرکز و غیرمتمرکز جزئی درگیر و غیردرگیر

Table 1. Appropriate arrangement of  $Y_R$  and  $Q_R$  matrices to create fully decentralized and partial decentralized controllers

الف-کنترل کاملاً غیرمتمرکز	ب-کنترل غیرمتمرکز جزئی درگیر	ج-کنترل غیرمتمرکز جزئی غیردرگیر
$Q_R = \begin{bmatrix} Q_{R11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{R22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{R33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{R44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{R55} \end{bmatrix}$ $Y_R = \begin{bmatrix} Y_{R11} & Y_{R12} & 0 & 0 & 0 \\ Y_{R21} & Y_{R22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{R33} & Y_{R34} & Y_{R35} \\ 0 & 0 & Y_{R43} & Y_{R44} & Y_{R45} \\ 0 & 0 & Y_{R53} & Y_{R54} & Y_{R55} \end{bmatrix}$	$Q_R = \begin{bmatrix} Q_{R11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{R22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{R33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{R44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{R55} \end{bmatrix}$ $Y_R = \begin{bmatrix} Y_{R11} & Y_{R12} & Y_{R13} & 0 & 0 \\ Y_{R21} & Y_{R22} & Y_{R23} & 0 & 0 \\ Y_{R31} & Y_{R32} & Y_{R33} & Y_{R34} & Y_{R35} \\ 0 & 0 & Y_{R43} & Y_{R44} & Y_{R45} \\ 0 & 0 & Y_{R53} & Y_{R54} & Y_{R55} \end{bmatrix}$	$Q_R = \begin{bmatrix} Q_{R11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{R22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{R33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{R44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{R55} \end{bmatrix}$ $Y_R = \begin{bmatrix} Y_{R11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{R22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{R33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_{R44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{R55} \end{bmatrix}$



شکل ۲. فلوجارت فرایند طراحی کنترلرهای متمرکز و غیرمتمرکز  $H_\infty$  با وجود گسیختگی سنسورها و عدم قطعیت تحریکات زلزله

Fig. 2. the flowchart of design process of centralized and decentralized  $H_\infty$  controllers despite sensor failures and earthquake excitations uncertainty

با این ترتیب معادله بهینه‌سازی رابطه (۱۸) به شکل زیر در می‌آید:

$$\begin{bmatrix} SQ_s S^T A^T + RQ_R R^T A^T + ASQ_s S^T + ARQ_R R^T + & * \\ RY_R^T F^T B_u^T + B_u F Y_R R^T + E E_w^T \eta & \\ C_z S Q_s S^T + C_z R Q_R R^T + D_z F Y_R R^T & -I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (21)$$

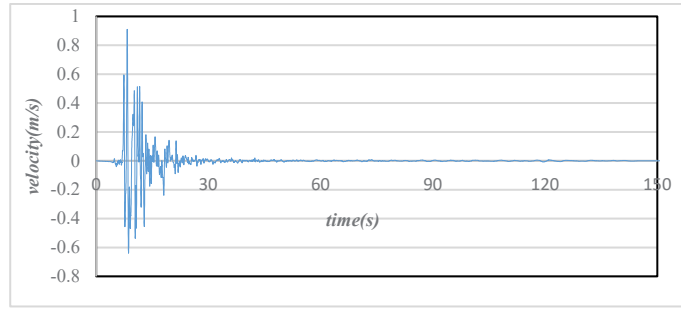
به این ترتیب معادله بهینه‌سازی رابطه (۱۸) به شکل زیر در می‌آید:

$$\begin{cases} \text{maximize } \eta \\ \text{subject to } Q_s > 0, Q_R > 0, \eta > 0 \text{ and the LMI in Eq. (21)} \end{cases} \quad (22)$$

با حل معادله (۲۱) مقدار ماتریس بهره  $k_f$  طبق رابطه ی

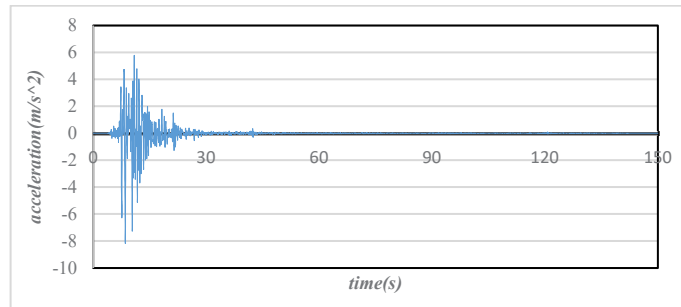
کف =  $Y_R Q_R^{-1}$  محاسبه می‌شود. به این ترتیب با اعمال ساختار صفر و غیرصفر مناسب به ماتریس‌های  $Y_R$  و  $Q_R$  می توان الگوریتم کنترل غیرمتمرکز مورد نظر را ایجاد نمود. جدول ۱ آرایش مناسب ماتریس‌های  $Q_R$  و  $Y_R$  جهت ایجاد کنترلرهای کاملاً غیرمتمرکز و غیرمتمرکز جزئی درگیر و غیردرگیر را نشان می‌دهد.

به طور خلاصه روند کار در پروژه ی حاضر در فلوجارت شکل (۲) آمده است.



شکل ۳. داده‌های سرعت زلزله شمال-جنوب کوبه ۱۹۹۵

Fig. 3. The full-scale North-South Kobe 1995 seismic record velocity



شکل ۴. داده‌های شتاب زلزله شمال-جنوب کوبه ۱۹۹۵

Fig. 4. The full-scale North-South Kobe 1995 seismic record acceleration

۳- مثال‌های عددی

برای بررسی میزان کارایی روش مورد نظر در مقابل انواع عدم قطعیت‌ها، گسیختگی سنسورها و نیز نحوه عملکرد کنترلرهای غیرمتمرکز در مقایسه با کنترلر متمرکز در برابر انواع عدم قطعیت‌ها، دو نوع سازه برشی مورد ارزیابی قرار گرفته‌است، سازه برشی ۵ طبقه و سازه برشی ۲۰ طبقه. از دلایل انتخاب این سازه‌ها می‌توان به موجود بودن مشخصات دینامیکی آنها و نیز نتایج کنترلر غیرمتمرکز مربوط به آنها در مقالات دیگر اشاره نمود.

برای بررسی‌های عددی داده‌های زلزله شمال-جنوب کوبه ۱۹۹۵ با شتاب مطلق  $8.18 \frac{m}{s^2}$  جهت تحریک مدل‌های سازه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌است. شتاب و سرعت زلزله‌ی مورد استفاده به ترتیب در اشکال ۳ و ۴ آمده‌است.

### ۳-۱- سازه برشی ۵ طبقه

مشخصات سازه برشی ۵ طبقه‌ی مورد بررسی به شرح زیر است:

$$M = 10^3 \times \begin{bmatrix} 215.2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 209.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 207 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 204.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 266.1 \end{bmatrix} kg,$$

$$K = 10^6 \times \begin{bmatrix} 260 & -113 & 0 & 0 & 0 \\ -113 & 212 & -99 & 0 & 0 \\ 0 & -99 & 188 & -89 & 0 \\ 0 & 0 & -89 & 173 & -84 \\ 0 & 0 & 0 & -84 & 84 \end{bmatrix} \frac{N}{m}$$

$$C = 10^5 \times \begin{bmatrix} 6.5042 & -2.3111 & 0 & 0 & 0 \\ -2.3111 & 5.4894 & -2.0248 & 0 & 0 \\ 0 & -2.0248 & 4.9864 & -1.8203 & 0 \\ 0 & 0 & -1.8203 & 4.6675 & -1.7180 \\ 0 & 0 & 0 & -1.7180 & 3.1853 \end{bmatrix} \frac{Ns}{m}$$

برای عدم قطعیت در تحریکات زلزله دو حالت فرض شده‌است:

$$\Delta \ddot{x}_g = 10\% \text{ \& } 60\%$$

برای گسیختگی سنسورها نیز ۴ حالت در نظر گرفته شده‌است:

$$\text{Case0: } \Delta \ddot{x}_g = 0\% \text{ \& } 0\% \text{ گسیختگی, } f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = 1$$

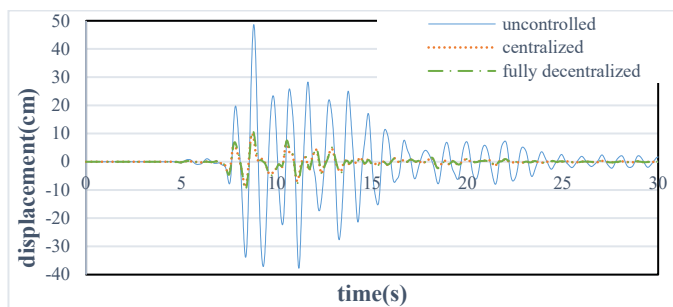
$$\text{Case1: } \Delta \ddot{x}_g = 10\% \text{ \& } 10\% \text{ گسیختگی, } f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = 0.9$$

$$\text{Case2: } \Delta \ddot{x}_g = 60\% \text{ \& } 60\% \text{ گسیختگی, } f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = 0.4$$

Case3:  $\Delta \ddot{x}_g = 0\% \text{ \& } 70\%$  گسیختگی در طبقات اول و دوم،

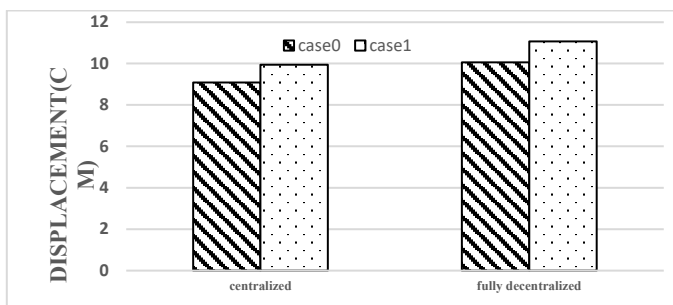
$$f_1 = f_2 = 0.3 \text{ \& } f_3 = f_4 = f_5 = 1$$





شکل ۵. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان طبقه پنجم سازه برشی ۵ طبقه در حالت ۱

Fig. 5. The time history of the displacement response of the 5 story shear structure in the fifth floor in case 1



شکل ۶. تغییر مکان ماکزیمم طبقه‌ی پنجم سازه برشی ۵ طبقه با کنترلر متمرکز و کاملاً غیر متمرکز در حالات ۱ و ۰

Fig. 6. Maximum displacement of the 5th floor of 5-story shear structure with centralized and fully decentralized controller in 1 and 0 cases

است، تغییر مکان در کنترلر متمرکز و کاملاً غیر متمرکز در مقایسه با مدل کنترل نشده به طور قابل توجهی کاهش یافته است. ماکزیمم تغییر مکان در مدل کنترل نشده ۴۸/۷ سانتی متر است که با کنترلر متمرکز و کاملاً غیر متمرکز به ترتیب به مقادیر ۹/۹۴ (٪۷۹/۵ کاهش) و ۱۱ (٪۷۷/۴ کاهش) سانتی متر کاهش می یابد.

شکل ۶ مقادیر تغییر مکان ماکزیمم طبقه‌ی پنجم سازه‌ی برشی ۵ طبقه در کنترلرهای متمرکز و کاملاً غیر متمرکز را در دو حالت ۰ و ۱ مقایسه می کند. با اعمال عدم قطعیت ۱۰٪ در سنسورهای تمامی طبقات و نیز عدم قطعیت ۱۰٪ در شتاب زلزله در کنترلر متمرکز حدود ۸/۵ میلی متر (۹/۴۳٪) و در کنترلر کاملاً غیر متمرکز حدود ۱ سانتی متر (۱۰٪) تغییر مکان افزایش یافته است.

شکل ۷ تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان طبقه‌ی پنجم سازه‌ی برشی ۵ طبقه را در مدل کنترل نشده و مدل کنترل شده با اعمال کنترلر متمرکز و کاملاً غیر متمرکز در حالت ۲ (۶۰٪ گسیختگی سنسور و ۶۰٪ عدم قطعیت تحریک زلزله) نشان می دهد. در این حالت تغییر مکان طبقه‌ی پنجم از ۴۸/۶۷ سانت در مدل کنترل نشده به ۱۴/۵۴

۳-۲- سازه برشی ۲۰ طبقه

جرم و سختی طبقات سازه برشی ۲۰ طبقه به شرح زیر است:

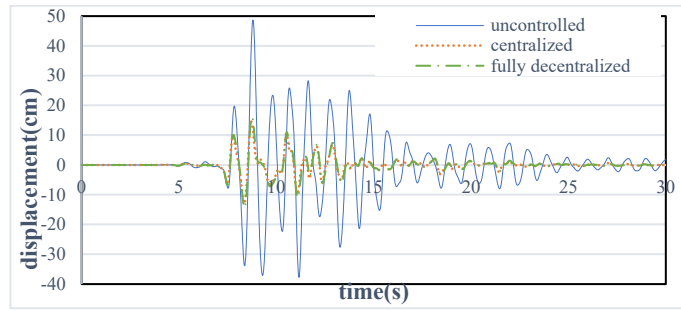
$$m_1 = 1.126 \times 10^6 \text{ kg}, m_2 - m_{19} = 1.1 \times 10^6 \text{ kg}, m_{20} = 1.17 \times 10^6 \text{ kg}, k_1 - k_5 = 862.07 \times \frac{10^6 \text{ N}}{m}, k_6 - k_{11} = 554.17 \times \frac{10^6 \text{ N}}{m}, k_{12} - k_{14} = 453.51 \times \frac{10^6 \text{ N}}{m}, k_{15} - k_{17} = 291.23 \times \frac{10^6 \text{ N}}{m}, k_{18} - k_{19} = 256.46 \times \frac{10^6 \text{ N}}{m}, k_{20} = 171.7 \times \frac{10^6 \text{ N}}{m}$$

#### ۴- نتایج

۴-۱- سازه برشی ۵ طبقه

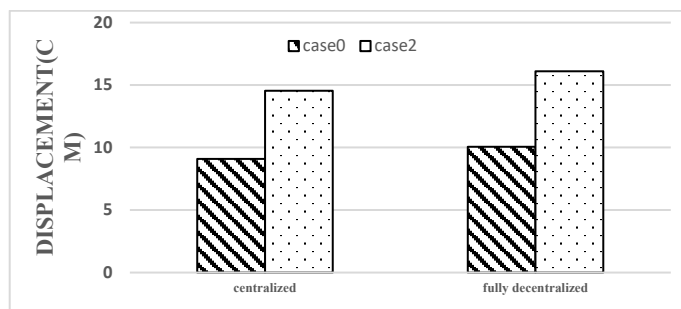
شکل ۵ تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان طبقه‌ی پنجم را در حالت ۱ (۱۰٪ گسیختگی سنسور و ۱۰٪ عدم قطعیت تحریک زلزله) در مدل های کنترل نشده، دارای کنترلر متمرکز و دارای کنترلر کاملاً غیر متمرکز در سازه برشی ۵ طبقه نشان می دهد. همان طور که در شکل مشخص





شکل ۷. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان طبقه پنجم سازه برشی ۵ طبقه در حالت ۲

Fig. 7. The time history of the displacement response of the 5 story shear structure in the fifth floor in case2



شکل ۸. تغییر مکان ماکزیمم طبقه‌ی پنجم سازه برشی ۵ طبقه با کنترلر متمرکز و کاملاً غیر متمرکز در حالات ۲ و ۰

Fig. 8. Maximum displacement of the 5th floor of 5-story shear structure with centralized and fully decentralized controller in 2 and 0 cases

جدول ۲. تغییر مکان ماکزیمم در کنترلر متمرکز و کاملاً غیر متمرکز در حالت ۰ و ۲ در طبقات ۱، ۳ و ۵

Table 2. Maximum displacement in centralized and fully decentralized controllers in 0 and 2 cases in the first, third and fifth stories

طبقه	کنترلر متمرکز		کنترلر کاملاً غیر متمرکز	
	حالت ۰	حالت ۲	حالت ۰	حالت ۲
۱	۲/۸۴۵۵	۴/۱۵۶۱	۲/۵۲۱۶	۴/۰۳۴۶
۳	۶/۸۶۵۱	۱۰/۳۷۵۱	۷/۲۴۹۶	۱۱/۵۹۹۳
۵	۹/۰۸۴۵	۱۴/۵۴۳	۱۰/۰۵۸۵	۱۶/۰۹۳۴

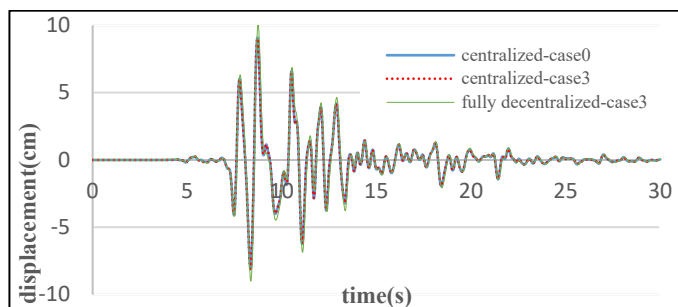
مشاهده می‌شود در حالت ۲ تغییر مکان‌ها افزایش یافته‌است. این افزایش در طبقات اول، سوم و پنجم به ترتیب برابر ۴۶٪، ۵۱٪ و ۶۰٪ است. در هر دو حالت ۱ و ۲ کنترلر کاملاً غیر متمرکز نتایجی نزدیک به کنترلر متمرکز دارد اما مشابه کنترلر متمرکز، در حالت ۲ تغییر مکان‌ها به طور متوسط در تمامی طبقات حدود ۶۰٪ نسبت به حالت ۰ افزایش یافته‌است.

تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان طبقه‌ی پنجم سازه‌ی برشی ۵ طبقه در حالت ۳ (۷۰٪ گسیختگی سنسور بدون عدم قطعیت زلزله)

سانت در کنترلر متمرکز و ۱۶ سانت در کنترلر کاملاً غیر متمرکز کاهش یافته‌است. مقایسه‌ی شکل ۵ و ۷ به خوبی نشان می‌دهد که تغییر مکان‌ها با افزایش گسیختگی و عدم قطعیت در حالت ۲ نسبت به حالت ۱ افزایش یافته‌است.

شکل ۸ میزان تغییر مکان ماکزیمم طبقه‌ی پنجم را در دو حالت ۰ و ۲ مقایسه می‌کند. بر اساس نتایج، اختلاف مدل اسمی حالت ۰ و نامعین حالت ۲ در کنترلر متمرکز به ۵/۴۵ سانتی متر و در کنترلر کاملاً غیر متمرکز به ۶ سانتی متر رسیده‌است. مقایسه‌ی نتایج با شکل ۶ نشان می‌دهد که در حالت ۲ تغییر مکان‌های ماکزیمم نسبت به حالت ۱ نیز حدود ۴/۵ سانتی متر افزایش یافته‌است. بررسی نتایج حاکی از آن است که با ایجاد عدم قطعیت ۶۰٪ در شتاب زلزله و نیز گسیختگی سنسور، تغییر مکان ماکزیمم نیز نسبت به مدل معین حدود ۶۰٪ افزایش یافته‌است.

جدول ۲ مقادیر عددی تغییر مکان ماکزیمم در طبقات اول، سوم و پنجم سازه‌ی برشی ۵ طبقه را در دو حالت ۰ و ۲ مقایسه می‌کند. بر اساس جدول در کنترلر متمرکز اختلاف بین دو حالت ۰ و ۲ در طبقات اول، سوم و پنجم به ترتیب برابر ۳۱/۱، ۵۱/۳ و ۴۵/۵ است. همان‌طور که



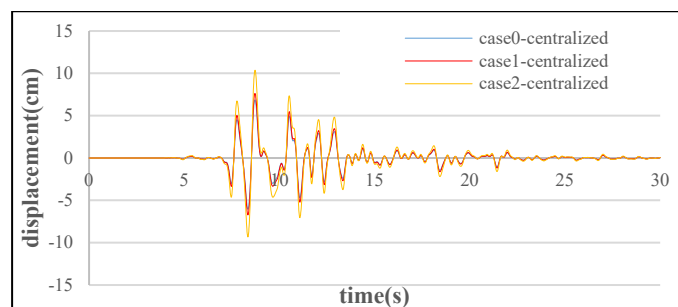
شکل ۹. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان طبقه پنجم سازه برشی ۵ طبقه در حالات ۰ و ۳

Fig. 9. The time history of the displacement response of the 5 story shear structure in the fifth floor in case3

جدول ۳. تغییر مکان ماکزیمم در کنترلر متمرکز و کاملاً غیرمتمرکز در حالت ۰ و ۳ در طبقات ۱، ۳ و ۵

Table 3. Maximum displacement in centralized and fully decentralized controllers in 0 and 3 cases in the first, third and fifth stories

طبقه	کنترلر متمرکز		کنترلر کاملاً غیرمتمرکز	
	حالت ۰	حالت ۳	حالت ۰	حالت ۳
۱	۲/۸۴۵۵	۲/۶۲۱۷	۲/۵۲۱۶	۲/۵۲۱۶
۳	۶/۸۶۵۱	۶/۸۰۷۰	۷/۲۴۹۶	۷/۲۴۹۶
۵	۹/۰۸۴۵	۹/۰۲۹۳	۱۰/۰۵۸۵	۱۰/۰۵۸۴



شکل ۱۰. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان طبقه‌ی سوم سازه‌ی برشی ۵ طبقه در کنترلر متمرکز در حالات ۰، ۱ و ۲

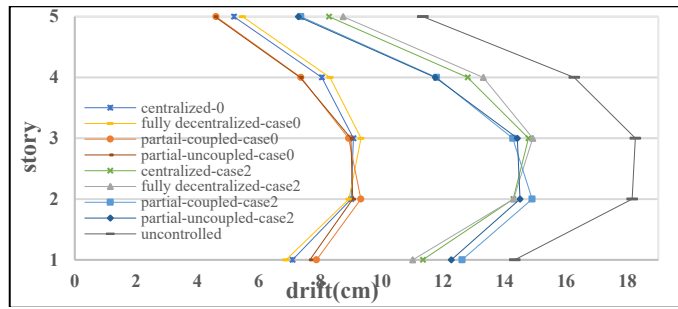
Fig. 10. The time history of the displacement response of the 5 story shear structure in the third floor in 0, 1 and 2 cases with centralized controller

و گسیختگی ۷۰ درصدی سنسور روی پاسخ‌ها تأثیری ندارد. به عبارتی روش کنترل  $H_\infty$  در مقابل گسیختگی سنسور به طور مقاوم عمل نموده‌است. از طرفی مقایسه‌ی نتایج کنترلر متمرکز و کاملاً غیرمتمرکز نشان می‌دهد که کنترلر کاملاً غیرمتمرکز در طبقه‌ی اول حدود ۳ میلی‌متر، در طبقه سوم حدود ۴ میلی‌متر و در طبقه‌ی پنجم همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، این اختلاف حدود ۱ سانتی‌متر است.

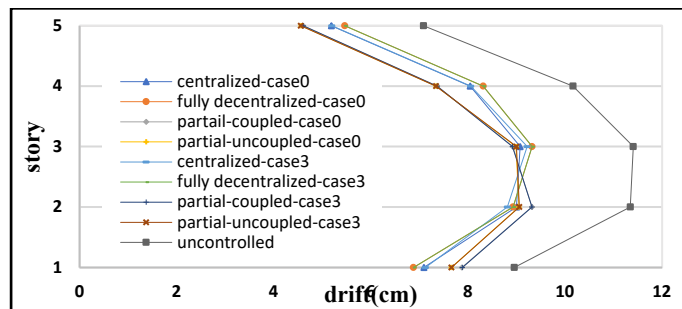
شکل ۱۰ تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان کنترلرهای متمرکز را در حالت ۰، ۱ و ۲ به ترتیب در طبقه سوم مقایسه می‌کند. میزان تغییر مکان در حالت ۱ بیش از حالت ۰ و در حالت ۲ بیش از حالت ۱ است. در تائیه ی ۷/۸ تغییر مکان طبقه‌ی سوم در حالت ۰، ۴/۸۵ سانتی‌متر، در حالت ۱، ۵/۳ سانتی‌متر و در حالت ۲، ۷/۸۴ سانتی‌متر

در کنترلرهای متمرکز و کاملاً غیرمتمرکز و در حالت ۰ در کنترلر متمرکز در شکل ۹ آمده است. پاسخ تغییر مکان کنترلر متمرکز در حالت ۳ تقریباً منطبق بر تغییر مکان کنترلر متمرکز در حالت ۰ است. یعنی گسیختگی ۷۰ درصدی در سنسورها پاسخ‌ها را تحت تأثیر قرار نداده‌است. مقایسه‌ی پاسخ کنترلر کاملاً غیرمتمرکز حالت ۳ با پاسخ کنترلر متمرکز آن نشانگر این است که در کنترلر کاملاً غیرمتمرکز پاسخ‌ها نسبت به کنترلر متمرکز اندکی افزایش یافته‌است. این افزایش در تغییر مکان ماکزیمم ۱ سانتی‌متر است.

جدول ۳ تغییر مکان ماکزیمم کنترلرهای متمرکز و کاملاً غیرمتمرکز را در دو حالت ۰ و ۳ مقایسه می‌کند. همان‌گونه که جدول نشان می‌دهد، تقریباً می‌توان گفت که حالت ۰ و حالت ۳ تفاوتی با یکدیگر ندارند



شکل ۱۱. ماکزیمم تغییر مکان بین طبقه‌ای (دریفت) در حالات ۰ و ۲ در سازه‌ی برشی ۵ طبقه  
 Fig. 11. Maximum drift response of the 5 story shear structure in 0 and 2 cases



شکل ۱۲. ماکزیمم تغییر مکان بین طبقه‌ای (دریفت) در حالات ۰ و ۳ در سازه‌ی برشی ۵ طبقه  
 Fig. 12. Maximum drift response of the 5 story shear structure in 0 and 3 cases

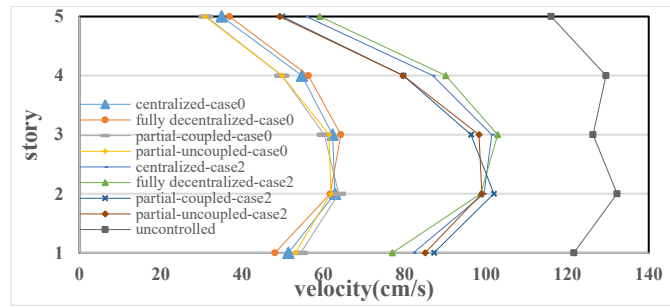
در کنترلرهای غیرمتمرکز جزئی کاهش بیشتری در پاسخ به وجود آمده‌است. همچنین در طبقه اول کنترلر کاملاً غیرمتمرکز پاسخ کمتری نسبت به کنترلر متمرکز ایجاد نموده‌است ولی در طبقه‌ی دوم دو کنترلر بر هم منطبق بوده و در طبقات بالاتر کنترلر متمرکز بهتر از کنترلر کاملاً غیرمتمرکز عمل نموده‌است.

اشکال ۱۳ و ۱۴ ماکزیمم سرعت در سازه‌ی برشی ۵ طبقه را به ترتیب در حالات ۰ و ۲ و حالات ۰ و ۳ نشان می‌دهند. بر اساس شکل ۱۲ مشابه پاسخ دریفت مقدار سرعت در حالت ۲ نسبت به حالت ۰ افزایش یافته‌است. پاسخ سرعت در حالت ۲ حدود ۴۰ سانتی‌متر بر ثانیه نسبت به حالت ۰ افزایش یافته‌است. با وجود ایجاد عدم قطعیت و شکست سنسورها باز هم در حالت ۲ پاسخ‌ها در مقایسه با مدل کنترل نشده حدود ۴۰ سانتی‌متر بر ثانیه کاهش یافته‌است. باز هم کنترلرهای مختلف نزدیک به هم عمل نموده‌اند. ولی به صورت مقایسه‌ای در طبقه‌ی اول کنترلر متمرکز و کاملاً غیرمتمرکز عملکرد بهتری دارند ولی در طبقات بالاتر کنترلرهای غیرمتمرکز جزئی بهتر عمل نموده‌اند. بر اساس شکل ۱۴ پاسخ سرعت مشابه پاسخ دریفت در حالت ۳ تقریباً منطبق بر حالت ۰ است. یعنی گسیختگی سنسور پاسخ سرعت را نیز تحت تاثیر

است. یعنی در حالت ۱ حدود ۸٪ افزایش نسبت به حالت ۰ و در حالت ۲ حدود ۶۰٪ افزایش نسبت به حالت ۰ اتفاق افتاده‌است.

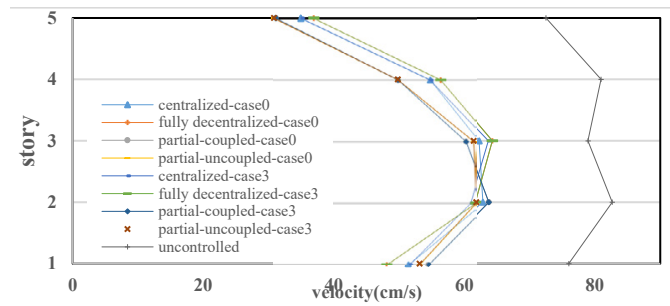
اشکال ۱۱ و ۱۲ ماکزیمم دریفت بین طبقه‌ای را به ترتیب در حالات ۰ و ۲ و حالات ۰ و ۳ و نیز مدل کنترل نشده نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۱۱ به طور متوسط حدود ۴ سانتی‌متر افزایش در پاسخ دریفت در حالت ۲ نسبت به حالت ۰ اتفاق افتاده‌است. همچنین در حالت ۲ نسبت به مدل کنترل نشده به طور متوسط حدود ۴ سانتی‌متر کاهش در پاسخ دریفت رخ داده‌است. در مورد کنترلرها نیز، تقریباً می‌توان گفت که کنترلرهای مختلف نتایج بسیار نزدیکی دارند. در طبقه‌ی اول کنترلر متمرکز و کاملاً غیرمتمرکز بهتر عمل نموده‌اند ولی در طبقات ۲ تا ۵ کنترلرهای غیرمتمرکز جزئی عملکرد بهتری داشته‌اند.

بر اساس شکل ۱۲ در حالت ۳ مقدار دریفت بین طبقه‌ای به مقدار بسیار جزئی نسبت به حالت ۰ افزایش یافته‌است. در واقع می‌توان گفت که دریفت بین طبقه‌ای در دو حالت برهم منطبق هستند. نسبت به مدل کنترل نشده به طور متوسط حدود ۳ سانتی‌متر کاهش پاسخ اتفاق افتاده‌است. در مورد کنترلرها نیز در طبقات اول و دوم کنترلرهای متمرکز و کاملاً غیرمتمرکز عملکرد بهتری دارند ولی در طبقات بالاتر



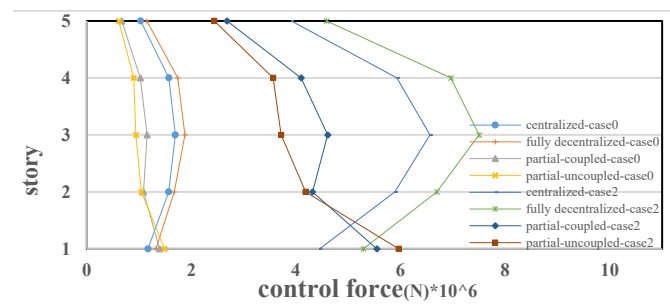
شکل ۱۳. ماکزیمم سرعت در حالات ۰ و ۲ در سازه‌ی برشی ۵ طبقه

Fig. 13. Maximum velocity response of the 5 story shear structure in 0 and 2 cases



شکل ۱۴. ماکزیمم سرعت در حالات ۰ و ۳ در سازه‌ی برشی ۵ طبقه

Fig. 14. Maximum velocity response of the 5 story shear structure in 0 and 3 cases



شکل ۱۵. ماکزیمم نیروی کنترل در حالات ۰ و ۲ در سازه‌ی برشی ۵ طبقه

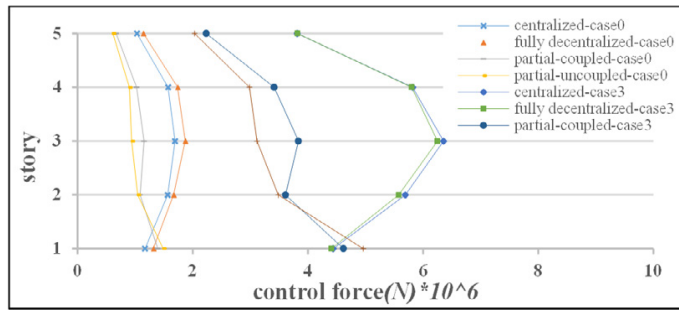
Fig. 15. Maximum control force of the 5 story shear structure in 0 and 2 cases

نیاز دارد. همچنین در هر دو حالت کنترلر کاملاً غیرمتمرکز بیشترین نیروی کنترل را نیاز دارد.

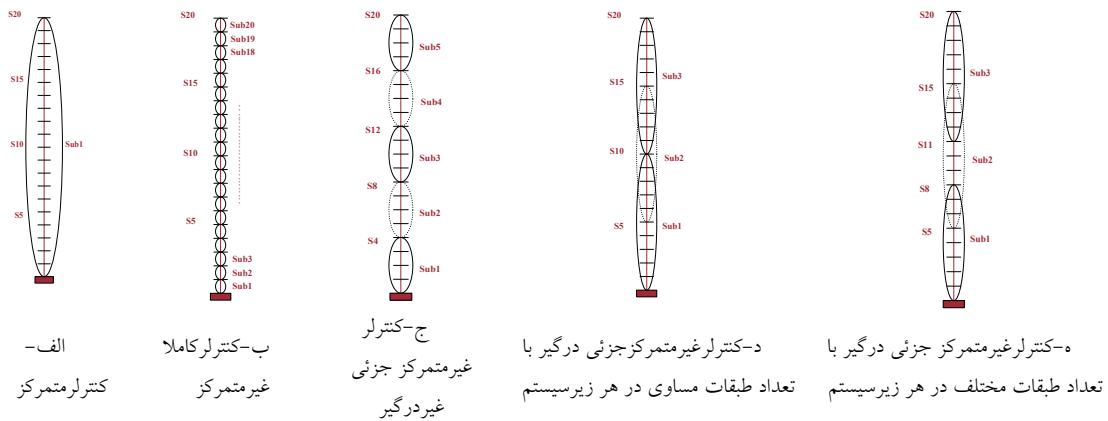
در شکل ۱۶ به مقایسه‌ی ماکزیمم نیروی کنترل مورد نیاز در سازه‌ی برشی ۵ طبقه در دو حالت ۰ و ۳ پرداخته‌ایم. مشابه شکل ۱۵ در حالت ۳ مقدار نیروی کنترل مورد نیاز در مقایسه با حالت ۰ افزایش یافته‌است ولی مقدار این افزایش در مقایسه با حالت ۲ کمتر است. در میان کنترلرهای مختلف کنترلر غیرمتمرکز جزئی‌گیر درگیر کمترین مقدار نیروی کنترل و کنترلر کاملاً غیرمتمرکز بیشترین نیروی کنترل را نیاز دارد. مقدار ماکزیمم نیروی کنترل در حالت ۳ با وجود گسیختگی ۷۰ درصدی سنسورهای

قرار نداده‌است. پاسخ نسبت به مدل کنترل نشده به طور متوسط حدود ۳۰ سانتی‌متر بر ثانیه کاهش یافته‌است. مشابه حالات قبل در طبقه اول پاسخ کمتر مربوط به کنترلر متمرکز و کاملاً غیرمتمرکز و در طبقات بالاتر مربوط به کنترلرهای غیرمتمرکز جزئی‌است.

شکل ۱۵ ماکزیمم مقدار نیروی کنترل در دو حالت ۰ و ۲ با کنترلرهای مختلف مقایسه می‌کند. در حالت ۲ با ایجاد عدم قطعیت در شتاب زلزله و نیز گسیختگی ۶۰ درصدی سنسورها مقدار نیروی کنترل مورد نیاز در مقایسه با حالت ۰ افزایش یافته‌است. هم در حالت ۰ و هم در حالت ۲ کنترلر غیرمتمرکز جزئی‌گیر درگیر به نیروی کنترل کمتری

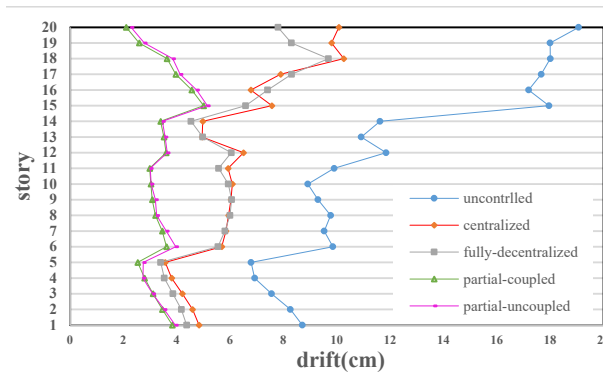


شکل ۱۶. ماکزیمم نیروی کنترل در حالات ۰ و ۳ در سازه‌ی برشی ۵ طبقه  
 Fig. 16. Maximum control force of the 5 story shear structure in 0 and 3 cases



شکل ۱۷. الگوریتم‌های مختلف کنترل برای سازه برشی ۲۰ طبقه

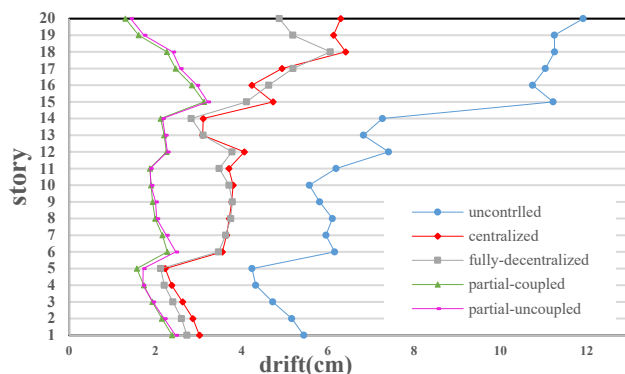
Fig. 17. Different controller algorithms for the 20 story benchmark building: (a) Centralized Controller, (b) fully decentralized controller, (c) partial decentralized controller (uncoupled), (d) partial decentralized controller (coupled) equal stories, (e) partial decentralized controller (coupled) different stories



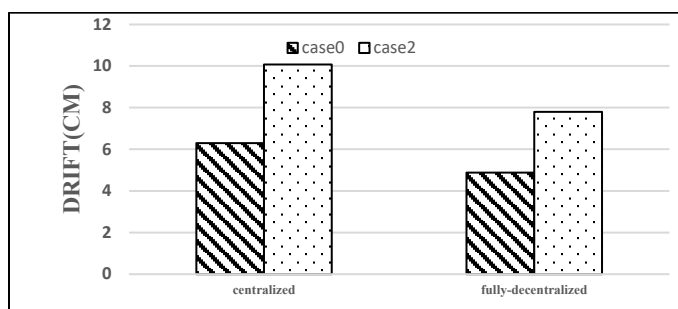
شکل ۱۸. ماکزیمم تغییر مکان بین طبقه‌ای در حالت ۲ در سازه برشی ۲۰ طبقه  
 Fig. 18. Maximum inter story drifts for 20 story building in case2

را با کنترلرهای مختلف و در حالات ۲ و ۳ بررسی کردیم. شکل ۱۸ ماکزیمم دررفت بین طبقه‌ای در سازه‌ی برشی ۲۰ طبقه را در مدل کنترل نشده و نیز مدل کنترل شده با کنترلرهای متمرکز، کاملاً غیر متمرکز و غیر متمرکز جزئی درگیر و غیر درگیر در حالت ۲، یعنی احتمال گسیختگی ۶۰ درصدی سنسورها و عدم قطعیت ۶۰

طبقات ۱ و ۲ در مقایسه با حالت ۰ حدود ۳ برابر افزایش یافته است. ۴-۲- سازه برشی ۲۰ طبقه برای ارزیابی رفتار کنترلرها در برابر گسیختگی سنسورها و عدم قطعیت تحریکات زلزله در سازه‌های بلند، رفتار سازه‌ی برشی ۲۰ طبقه



شکل ۱۹. ماکزیمم تغییرمکان بین طبقه‌های در حالت ۳ در سازه برشی ۲۰ طبقه  
Fig. 19. Maximum inter story drifts for 20 story building in case3



شکل ۲۰. دریفت بین طبقه‌های ماکزیمم در کنترلر متمرکز و کاملاً غیرمتمرکز در حالات ۰ و ۲ در طبقه بیستم سازه‌ی ۲۰ طبقه  
Fig. 20. The maximum inter-story drift in centralized and fully decentralized controller in 0 and 2 cases 20th floor of 20-floor structure

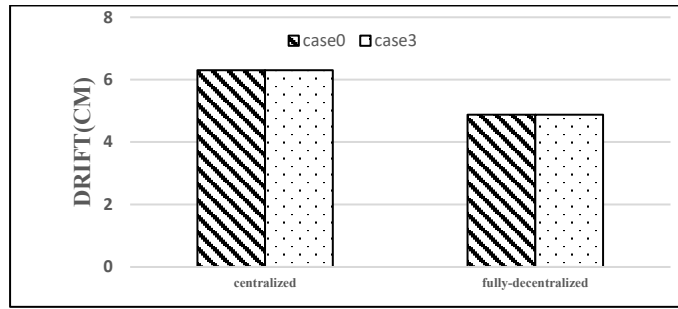
متمرکز است هر چند که نتایج آن با کنترلر کاملاً غیرمتمرکز بسیار نزدیک می‌باشد.

اکنون هدف این است بدانیم که اعمال گسیختگی سنسورها و نیز عدم قطعیت تحریکات زلزله پاسخ‌های سازه‌ای را در مقایسه با حالت اسمی سازه چه مقدار تحت تاثیر قرار داده‌است. برای این منظور در شکل ۲۰ ماکزیمم دریفت بین طبقه‌ای را در طبقه بیستم سازه‌ی ۲۰ طبقه در حالات ۰ و ۲ و کنترلرهای متمرکز و کاملاً غیرمتمرکز مقایسه نموده‌ایم. در کنترلر متمرکز با اعمال گسیختگی ۶۰ درصدی سنسورها و عدم قطعیت ۶۰ درصدی زلزله ماکزیمم دریفت نسبت به حالت ۰ حدود ۳/۷۶ سانتی‌متر و در کنترلر کاملاً غیرمتمرکز حدود ۲/۹۲ سانتی‌متر افزایش یافته‌است. این مقادیر اگر به صورت درصد بیان شوند حدود ۶۰٪ خواهند بود.

در شکل ۲۱ به طور مشابه ماکزیمم دریفت در حالات ۰ و ۳ را مقایسه نموده‌ایم. همان‌طور که مشخص است با وجود گسیختگی ۷۰ درصدی در سنسورهای طبقات ۱ و ۲ دریفت به صورت بسیار جزئی

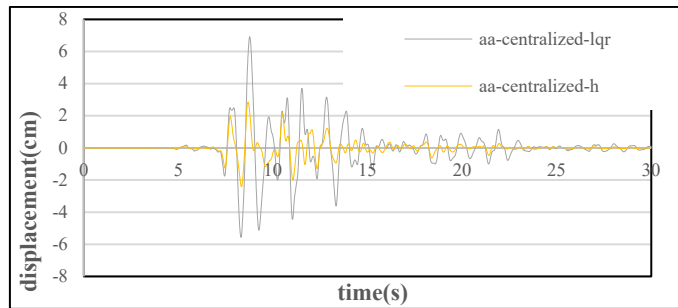
درصدی در تحریکات زلزله، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است با وجود عدم قطعیت پاسخ‌ها نسبت به مدل کنترل نشده کاهش یافته‌است. در بین کنترلرها، کنترلرهای غیرمتمرکز جزئی عملکرد بهتر و بسیار نزدیک به هم داشته‌اند، هرچند کنترلر غیرمتمرکز جزئی درگیر اندکی بهتر عمل نموده‌است. مقادیر حاصل از کنترلرهای متمرکز و کاملاً غیرمتمرکز نیز بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشند و جالب توجه است که کنترلر کاملاً غیرمتمرکز بهتر از کنترلر متمرکز عمل نموده‌است و البته کنترلر غیرمتمرکز جزئی عملکرد بسیار خوبی داشته‌است. همچنین تغییر تعداد طبقات در کنترلر غیرمتمرکز جزئی درگیر، تغییری در نتایج ایجاد نموده است.

شکل ۱۹ نیز مقادیر ماکزیمم دریفت‌ها را در سازه‌ی برشی ۲۰ طبقه در کنترلرهای مختلف در حالت ۳ نشان می‌دهد. نحوه‌ی عملکرد مشابه شکل ۱۸ می‌باشد. پاسخ‌ها با وجود گسیختگی سنسورها نسبت به مدل کنترل نشده کاهش یافته‌است. کنترلرهای غیرمتمرکز جزئی پاسخ سازه‌ای کمتری ایجاد نموده‌اند و بدترین عملکرد مربوط به کنترلر



شکل ۲۱. دریفت بین طبقه‌ای ماکزیمم در کنترلر متمرکز و کاملاً غیرمتمرکز در حالات ۰ و ۳ در طبقه‌ی بیستم سازه‌ی ۲۰ طبقه

Fig. 21. The maximum inter-story drift in centralized and fully decentralized controller in 0 and 2 cases in 20th floor of 20-floor structure



شکل ۲۲. تغییرمکان طبقه‌ی اول سازه‌ی برشی ۵ طبقه در حالت متمرکز با دو کنترلر  $H_\infty$  و LQR

Fig. 22. The time history of the displacement response of the 5 story centralized model in the first floor with  $H_\infty$  and LQR controllers

## ۵- پاسخ‌های سازه‌ای با استفاده از روش کنترل LQR (linear quadratic regulator)

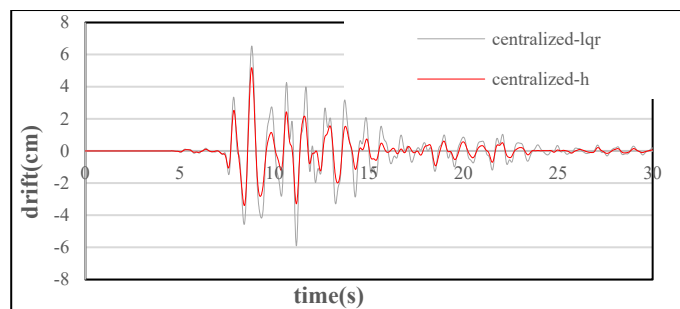
برای بررسی کارایی روش کنترل  $H_\infty$ ، در این بخش پاسخ‌های حاصل از روش مذکور را با روش کنترل دیگری موسوم به LQR مقایسه نموده‌ایم تا ببینیم تفاوتی در مقادیر دو روش کنترل وجود دارد و یا خیر و چنانچه تفاوت وجود دارد میزان این تفاوت چقدر است. برای این منظور تاریخچه‌ی زمانی پاسخ تغییرمکان سازه‌ی برشی ۵ طبقه را ارزیابی نموده‌ایم.

شکل ۲۲ تاریخچه‌ی زمانی پاسخ تغییر مکان طبقه‌ی اول سازه‌ی برشی ۵ طبقه را در دو کنترلر متمرکز  $H_\infty$  و LQR مقایسه می‌کند. همان‌طور که از شکل مشخص است میزان تغییر مکان در روش LQR بزرگتر از مقدار آن در روش کنترل  $H_\infty$  است. به عبارتی روش کنترل  $H_\infty$  در کاهش پاسخ‌های سازه‌ای به صورت موثرتری عمل می‌نماید و کاهش بیشتری در پی دارد. ماکزیمم تغییرمکان طبقه اول در روش کنترلی LQR حدود ۶/۹۲ سانتی‌متر است در حالی که تغییرمکان

تغییر کرده‌است. این تغییر به اندازه‌ای کوچک است که به راحتی می‌توان از آن صرف‌نظر کرد.

سازه‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر در مقالات با روش‌های کنترلی دیگر نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند لیکن در این پروژه به مسأله‌ی گسیختگی و خرابی سنسورها در کنار عدم قطعیت تحریکات زلزله در کنترلرهای غیرمتمرکز در همه‌انواع آنها با کنترلر  $H_\infty$  و روش LMI پرداخته شده است و تاثیر پارامترهای گسیختگی و عدم قطعیت همراه با به کار بردن کنترلرهای غیرمتمرکز بر پاسخ‌های سازه‌ای و مقاومت روش کنترلی در برابر آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است. چنان‌که از نتایج برمی‌آید روش کنترلی به کار رفته در مقایسه با روش‌های کنترلی دیگر در برابر خرابی سنسورها مقاومت خوبی دارد و پاسخ‌ها را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد، علاوه بر آن با به کار بردن نوع غیرمتمرکز کنترلر هزینه‌های کنترل نیز کاهش می‌یابد ضمن این‌که میزان کاهش پاسخ‌های سازه‌ای و نیز مقاومت سازه‌ها در برابر عدم قطعیت‌ها تغییر چندانی نمی‌کند.





شکل ۲۳. دریفت بین طبقه‌های طبقه‌ی پنجم سازه‌ی برشی ۵ طبقه در حالت متمرکز با دو کنترلر  $H_\infty$  و LQR

Fig. 23. The time history of the drift response of the 5 story centralized model in the fifth floor with  $H_\infty$  and LQR controllers

مورد استفاده در برابر عدم اطمینان و شکست، نمونه‌های عددی شامل سازه‌های برشی ۵ طبقه و ۲۰ طبقه مورد بررسی قرار گرفته‌است. شتاب زلزله شمال-جنوب کوبه ۱۹۹۵ به سازه‌ها وارد شده‌است و جابه‌جایی‌ها، سرعت‌ها، دریفت‌های بین طبقه‌ای و نیروهای کنترل در کنترل کننده‌های مختلف و چهار حالت عدم قطعیت و گسیختگی سنسورها با مدل کنترل نشده مقایسه شده‌اند.

#### براساس نتایج

۱- کنترلرهای غیرمتمرکز پاسخ‌ها را به طور چشمگیری کاهش می‌دهند، بنابراین کنترل کننده‌های متمرکز می‌توانند توسط هر کنترل کننده غیر متمرکز جایگزین شوند.

۲- کنترل کننده مقاوم  $H_\infty$  با فیدبک استاتیکی خروجی در اشکال متمرکز و غیرمتمرکز، به طور کامل در برابر گسیختگی‌های سنسور مقاوم است.

۳- با وجود عدم قطعیت زلزله، اگرچه پاسخ‌ها بسیار کمتر از مدل کنترل نشده‌است، ولی نسبت به حالت اول که در آن تغییر شتاب زلزله اعمال نشده بود افزایش می‌یابد.

۴- کنترلرهای غیرمتمرکز با وجود عدم قطعیت در شتاب زلزله نیز به خوبی کار می‌کنند.

۵- در میان روش‌های کنترل غیرمتمرکز، کنترل کننده غیرمتمرکز جزئی دارای عملکرد بسیار خوبی است، اما نیروی کنترل بیشتری لازم دارد، به همین دلیل کنترل کننده کاملاً غیرمتمرکز به نظر می‌رسد جایگزین خوبی برای کنترل کننده متمرکز باشد.

۶- با افزایش تعداد طبقات، نیز این روش به خوبی کار می‌کند و در سازه ۲۰ طبقه، نتایج مشابه با سازه پنج طبقه است. بنابراین، می‌توان

متناظر آن در روش کنترلی  $H_\infty$  حدود  $2/84$  سانتی‌متر است. به عبارتی روش کنترلی  $H_\infty$  حدود  $58\%$  بیشتر از روش کنترلی LQR پاسخ سازه‌ای را کاهش می‌دهد.

برای بررسی‌های بیشتر در شکل ۲۳ تاریخچه‌ی زمانی پاسخ دریفت بین طبقه‌ای دو روش کنترلی را در طبقه پنجم سازه‌ی برشی ۵ طبقه مقایسه نموده‌ایم. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد، باز هم کنترلر متمرکز LQR پاسخ‌های بزرگتری نسبت به کنترلر متمرکز  $H_\infty$  ایجاد نموده‌است. میزان ماکزیمم دریفت در کنترلر LQR حدود  $1/5$  سانتی‌متر بیش از کنترلر  $H_\infty$  می‌باشد.

#### ۶- جمع بندی

در این مقاله، کنترل کننده مقاوم  $H_\infty$  با فیدبک استاتیکی خروجی و نامساوی‌های ماتریسی خطی استفاده شده‌است. کنترل کننده‌های متمرکز و غیرمتمرکز مختلف و تأثیر آن‌ها بر کاهش پاسخ‌های سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌است. سپس عملکرد کنترل غیرمتمرکز در مدل‌های کاملاً غیرمتمرکز و غیرمتمرکز جزئی درگیر و غیردرگیر در مقایسه با کنترل متمرکز ارزیابی شده‌است. برای این منظور، نقش کنترل کننده‌ها برای کاهش پاسخ‌های سازه‌ای ارزیابی می‌شود. پس از آن، عدم قطعیت در شتاب زلزله و گسیختگی سنسورها در چهار حالت به مدل سازه‌ای اعمال شده‌است و توانایی روش کنترل به کار رفته در حالت متمرکز و غیرمتمرکز (در همه انواع آن) برای مقاومت در برابر عدم قطعیت تحریکات زلزله و گسیختگی سنسورها که هدف اصلی این تحقیق است، مورد بررسی قرار گرفته‌است.

برای نشان دادن کارایی، اثربخشی و میزان مقاومت روش کنترلی

- [13] K. Dhanalakshmi, M. Umopathy, D. Ezhilarasi, B.J.S.S. Bandyopadhyay, Systems, Design and implementation of fast output sampling feedback control for shape memory alloy actuated structures, 8(4) (2011) 367-384.
- [14] Z. Cao, Z.J.S.E. Lei, Mechanics, Feedback control design for intelligent structures with closely-spaced eigenvalues, 52(5) (2014) 903-918.
- [15] C.-H. Loh, C.-M. Chang, Application of centralized and decentralized control to building structure: analytical study, Journal of Engineering Mechanics, 134(11) (2008) 970-982.
- [16] J. Rubió-Massegú, F. Palacios-Quiñero, J.J.E.E. Rossell, S. Dynamics, Decentralized static output-feedback  $H_\infty$  controller design for buildings under seismic excitation, 41(7) (2012) 1199-1205.
- [17] J.P. Lynch, K.H. Law, Decentralized energy market-based structural control, Structural Engineering and Mechanics, 17(3-4) (2004) 557-572.
- [18] Y. Wang, R.A. Swartz, J.P. Lynch, K.H. Law, K.-C. Lu, C.-H.J.S.S. Loh, Systems, Decentralized civil structural control using real-time wireless sensing and embedded computing, 3(3) (2007) 321-340.
- [19] B. Chen, S. Nagarajaiah, Structural damage detection using decentralized controller design method, Smart structures and systems, 4(6) (2008) 779-794.
- [20] L.J.A.r.i.c. Bakule, Decentralized control: An overview, 32(1) (2008) 87-98.
- [21] Y. Lei, Y.J.F.o.M.E.i.C. Lin, New decentralized control technique based on substructure and LQG approaches, 4(4) (2009) 386.
- [22] T.-W. Ma, J. Johansen, N.-S. Xu, H.T. Yang, Improved decentralized method for control of building structures under seismic excitation, Journal of engineering mechanics, 136(5) (2010) 662-673.
- [23] J.-P. Jiang, D.-X.J.J.o.I.M.S. Li, Structures, Decentralized robust vibration control of smart structures with parameter uncertainties, 22(2) (2011) 137-147.
- [24] H. Du, N. Zhang, B. Samali, F.J.E.S. Naghdy, Robust sampled-data control of structures subject to parameter uncertainties and actuator saturation, 36 (2012) 39-48.
- [25] Y. Lei, D. Wu, Y. Lin, A decentralized control algorithm for large-scale building structures, Computer-Aided Civil
- گفت که در سازه‌های بلند، این روش به خوبی عمل می‌کند و عملکرد سازه را حفظ می‌کند.
- منابع**
- [1] G.W. Housner, L.A. Bergman, T.K. Caughey, A.G. Chassiakos, R.O. Claus, S.F. Masri, R.E. Skelton, T. Soong, B. Spencer, J.T.J.o.e.m. Yao, Structural control: past, present, and future, 123(9) (1997) 897-971.
- [2] A. Preumont, K. Seto, Active control of structures, John Wiley & Sons, 2008.
- [3] F.J.S.S. Ubertini, Systems, Active feedback control for cable vibrations, 4(4) (2008) 407-428.
- [4] S. Korkmaz, Structures, A review of active structural control: challenges for engineering informatics, Computers, 89(23-24) (2011) 2113-2132.
- [5] H.J.S.S. Ghaffarzadeh, Systems, Semi-active structural fuzzy control with MR dampers subjected to near-fault ground motions having forward directivity and fling step, 12(6) (2013) 595-617.
- [6] M. Askari, J. Li, B.J.S.S. Samali, Systems, Semi-active control of smart building-MR damper systems using novel TSK-Inv and max-min algorithms, 18(5) (2016) 1005-1028.
- [7] A. Younespour, H.J.S.S. Ghaffarzadeh, SYSTEMS, Semi-active control of seismically excited structures with variable orifice damper using block pulse functions, 18(6) (2016) 1111-1123.
- [8] A.G. Muthalif, H.B. Kasemi, N. Nordin, M. Rashid, M.K.M.J.S.S. Razali, SYSTEMS, Semi-active vibration control using experimental model of magnetorheological damper with adaptive F-PID controller, 20(1) (2017) 85-97.
- [9] M.T. Braz-Cesar, R.J.S.s. Barros, systems, Semi-active fuzzy based control system for vibration reduction of a sdof structure under seismic excitation, 4 (2018) 389-395.
- [10] T. Manjunath, B.J.S.S. Bandyopadhyay, Systems, Modeling and fast output sampling feedback control of a smart Timoshenko cantilever beam, 1(3) (2005) 283-308.
- [11] F.Y. Cheng, H. Jiang, K. Lou, Smart structures: innovative systems for seismic response control, CRC Press, 2008.
- [12] S. Beheshti-Aval, M.J.S.S. Lezgy-Nazargah, Systems, Assessment of velocity-acceleration feedback in optimal control of smart piezoelectric beams, 6(8) (2010) 921-938.

- [36] A.Y. Fallah, T. Taghikhany, Structures, Sliding mode fault detection and fault-tolerant control of smart dampers in semi-active control of building structures, *Smart Materials*, 24(12) (2015) 125030.
- [37] I. Venanzi, Robust optimal design of tuned mass dampers for tall buildings with uncertain parameters, *Structural Multidisciplinary Optimization*, 51(1) (2015) 239-250.
- [38] a.M. K. Chaker, b. Sbartai, Robust control of a seismic excited building facing to structured uncertainties, *WSEAS Transactions on Systems*, 16 (2017) 26-19.
- [39] A.T. Giaralis, Optimal tuned mass-damper-inerter (TMDI) design for seismically excited MDOF structures with model uncertainties based on reliability criteria, *Structural Control Health Monitoring*, 25(2) (2018) e2082.
- [40] Y. Lei, D.-T. Wu, S.-Z.J.E.S. Lin, Integration of decentralized structural control and the identification of unknown inputs for tall shear building models under unknown earthquake excitation, 52 (2013) 306-316.
- [41] W. Schmitendorf, F. Jabbari, J.J.E.e. Yang, s. dynamics, Robust control techniques for buildings under earthquake excitation, 23(5) (1994) 539-552.
- [42] Z. Cao, B. Wen, Z. Kuang, Feedback control of intelligent structures with uncertainties and its robustness analysis, *Structural Engineering and Mechanics*, 16(3) (2003) 327-340.
- [43] C. Lim, Y. Park, S.J.J.o.S. Moon, Vibration, Robust saturation controller for linear time-invariant system with structured real parameter uncertainties, 294(1-2) (2006) 1-14.
- [44] A.L. Materazzi, F.J.S.C. Ubertini, H. Monitoring, Robust structural control with system constraints, 19(3) (2012) 472-490.
- [45] A. Morales, J. Rongong, N.J.M.S. Sims, S. Processing, A finite element method for active vibration control of uncertain structures, 32 (2012) 79-93.
- Infrastructure Engineering, 27(1) (2012) 2-13.
- [26] Y.J. Cha, A.K.J.S.C. Agrawal, H. Monitoring, Decentralized output feedback polynomial control of seismically excited structures using genetic algorithm, 20(3) (2013) 241-258.
- [27] M. Ruiz-Sandoval, E. Morales, Complete decentralized displacement control algorithm, *Smart Structures and Systems*, 11(2) (2013) 163-183.
- [28] X.-G. Yan, S.K.J.J.o.t.F.I. Spurgeon, Decentralised delay-dependent static output feedback variable structure control, 351(4) (2014) 2033-2047.
- [29] N. Giron, M.J.S.C. Kohiyama, H. Monitoring, A robust decentralized control method based on dimensionless parameters with practical performance criterion for building structures under seismic excitations, 21(6) (2014) 907-925.
- [30] M. Kohiyama, M. Yoshida, LQG design scheme for multiple vibration controllers in a data center facility, *Earthquake and Structures*, 6(3) (2014) 281-300.
- [31] S.-Y. Chu, S.-W. Yeh, L.-Y. Lu, C.-H.J.E. Peng, Structures, Experimental verification of leverage-type stiffness-controllable tuned mass damper using direct output feedback LQR control with time-delay compensation, 12(4) (2017) 425-436.
- [32] H. Ghaffarzadeh, K.J.S.S. Aghabalaie, Systems, Adaptive fuzzy sliding mode control of seismically excited structures, 19(5) (2017) 577-585.
- [33] Y. Yu, L. Li, X. Leng, G. Song, Z. Liu, J.J.S.S. Ou, SYSTEMS, A wireless decentralized control experimental platform for vibration control of civil structures, 19(1) (2017) 47-56.
- [34] W. Zhang, Y. Chen, H.J.J.o.S. Gao, Vibration, Energy-to-peak control for seismic-excited buildings with actuator faults and parameter uncertainties, 330(4) (2011) 581-602.
- [35] H. Zhang, R. Wang, J. Wang, Y.J.M. Shi, Robust finite frequency  $H_\infty$  static-output-feedback control with application to vibration active control of structural systems, 24(4) (2014) 354-366.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم  
*R. Raji, H. Ghaffarzadeh, A. Hadidi, Decentralized control of tall shear structures against sensor failures and uncertainty in earthquake excitations, Amirkabir J. Civil Eng., 52(12) (2021) 3073-3090.*

DOI: [10.22060/ceej.2019.16541.6266](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16541.6266)

