

بهبود کنترل لرزه‌های سازه‌های قابی در برابر زلزله‌های دور و نزدیک گسل با استراتژی جدید کنترل بهینه خطی گوسی

مجید امین افشار^{۱*}

۱- استادیار، مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

*mafshar@eng.ikiu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۰۹/۳۰]

تاریخ دریافت: [۹۴/۰۹/۲۷]

چکیده- در این مقاله الگوریتم اصلاح شده کنترل گر بهینه خطی گوسی برای کنترل مؤثرتر پاسخ لرزه‌های سازه‌های قابی پیشنهاد می‌شود. بارهای محیطی (مانند زمین‌لرزه) در همان لحظه محاسبه و اعمال نیروی کنترل بر سازه، قابل اندازه‌گیری نیستند. از اینرو، این بارها در الگوریتم‌های کنترل متداول از جمله تنظیم‌گر درجه دوم خطی و کنترل گر بهینه خطی گوسی، لحاظ نمی‌شوند. بنابراین فرمان کنترل گر بهینه LQG فقط متناسب با حالت تقریبی سازه در لحظه اعمال نیروی کنترل است. در الگوریتم کنترل پیشنهادی، با بهره‌مندی از یک متغیر جدید، شتاب زلزله، در معادله تخمین گر فیلتر کالمن و تنظیم گر بهینه در نظر گرفته می‌شود. بر اساس روش پیشنهادی، دو نوع استراتژی کنترل ارائه می‌شود. فرمان کنترلی اول شامل نیروی کنترل، ضریبی از حالت تقریبی سیستم و خروجی سنسگرها، در گام زمانی پیشین، است. این حالت تقریبی سیستم در فرمان کنترل اول به وسیله الگوریتم فیلتر کالمن متداول و شناخته شده محاسبه می‌شود. در حالی که در استراتژی کنترلی دوم، نخست تخمین گر فیلتر کالمن بر اساس معادلات فضای حالت جدید اصلاح شده، و سپس از مقادیر حالت تقریبی سازه بدست آمده از آن، در محاسبه فرمان کنترل بهره گرفته می‌شود. تحلیل عددی کنترل فعال سازه هفت طبقه، برای ارزیابی تأثیر دو کنترل گر پیشنهادی در کاهش پاسخ لرزه‌های سازه تحت زلزله‌های نزدیک و دور از گسل و مقایسه آنها با پاسخ سازه بدون کنترل و با کنترل گر متداول LQG انجام گرفته است. همچنین حساسیت چند شاخص ارزیابی عملکرد کنترل گرها نسبت به تغییر پارامترهای کنترلی و آشفتگی سیستم با عدم یقین‌ها بررسی می‌شود. نتایج تحلیل بیانگر عملکرد مطلوب‌تر کنترل گر پیشنهادی دوم، و پایداری و استواری آن تحت تغییرات گسترده عدم یقین‌هاست، به گونه‌ای که بیشترین کاهش در بیشینه جابه‌جایی را توأم با صرف انرژی بسیار کم محقق می‌سازد.

واژگان کلیدی: کنترل بهینه LQG، فیلتر کالمن، کنترل فعال سازه، دینامیک سازه، زلزله.

۱- مقدمه

روش کنترل سازه، به طور گسترده استفاده شده‌اند [1]. امروزه، روش کنترل LQG به عنوان یکی از روش‌های پر کاربرد در کنترل بهینه سازه‌ها و مبنایی برای مقایسه و ارزیابی کارایی کنترل‌گرهای جدید شناخته می‌شود. برای نمونه گارونسکی^۳ برای کنترل سازه‌های منعطف و الاستیک، نظیر سازه ماهواره [2,3] و وو^۴ و یانگ^۵، برای کاهش حرکت جانبی برج ۳۱۰ متری تلویزیون شهر نانجینگ^۶ چین در برابر زمین‌لرزه‌های شدید، از کنترل گر LQG استفاده نمودند [4].

از دهه ۱۹۷۰، همگام با ارتقاء سطوح ایمنی، الزامات عملکردی و به کارگیری بهتر مصالح با هزینه کمتر، مفهوم کنترل سازه به عنوان روش جدید برای کاهش خسارات ناشی از زلزله، مطرح شد. روش‌های کنترل بهینه، مانند تنظیم‌گر خطی درجه دوم (LQR)، و کنترل خطی درجه دوم گوسی (LQG)، به عنوان یکی از چندین

4 Wu
5 Yang
6 Nanjing

1 Linear Quadratic Regulator
2 Linear Quadratic Gaussian Control
3 Gwronski

است.

هدف این مطالعه اصلاح الگوریتم کنترل بهینه خطی درجه دوم گوسی به منظور کاهش آثار منفی نادیده گرفتن تحریکات غیر قابل اندازه‌گیری، مانند زلزله، در سیستم کنترل است. در حقیقت، نوآوری این مقاله، تعریف و افزودن یک متغیر جدید، شامل نیروی کنترل و زلزله، و تشکیل معادلات فضای حالت جدید است. بر این اساس، دو نوع فرمان کنترل ارائه می‌شود فرمان کنترلی اول، شامل نیروی کنترل، ضریبی از حالت تقریبی سیستم و خروجی سنجش حسگرهایی است که در گام زمانی پیشین اعمال شده و بدست آمده‌اند. در حالیکه در فرمان کنترلی دوم، از مقادیر تخمین حالت بدست آمده از تخمین‌گر فیلتر کالمن اصلاح شده، که بر مبنای معادلات فضای حالت جدید است، بهره گرفته شده است. تحلیل عددی کنترل فعال سازه هفت طبقه، برای ارزیابی تأثیر دو کنترل‌گر پیشنهادی در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه و مقایسه آنها با پاسخ سازه بدون کنترل و با کنترل‌گر متداول LQG، انجام گرفته است. شتاب‌نگاشت‌های دو زلزله حوزه نزدیک گسل و دو زلزله حوزه دور از گسل، انتخاب و در تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شده‌اند. همچنین دو شاخص درصد کاهش جابه‌جایی بیشینه بام سازه کنترلی نسبت به وضعیت کنترل نشده و مجموع یا کل انرژی ابزارهای کنترل فعال، به منظور ارزیابی بهتر عملکرد کنترلی ارائه و مطالعه می‌شود. نتایج این شبیه‌سازی بیانگر عملکرد مطلوب‌تر کنترل‌گرهای پیشنهادی، به‌ویژه نوع دوم آن، و در عین حال پایداری و استواری آن تحت تغییرات زیاد عدم‌یقین‌هاست، به گونه‌ای که کاهش بیشتر پاسخ‌های لرزه‌ای سازه را سبب شده و در عین حال انرژی کنترلی کمتری نسبت به کنترل‌گر متداول صرف می‌نماید.

۲- الگوریتم‌های کنترل بهینه گوسی

معادله دیفرانسیل حرکت سازه به صورت زیر است:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Fw(t) + Du(t) \quad (1)$$

که در آن M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی، $x(t)$ بردار جابه‌جایی سازه، $u(t)$ بردار نیروهای کنترل و D ماتریس

شفیعی‌زاده و ریان، کنترل لرزه‌ای سازه‌های بزرگ‌مقیاس با رفتار غیرخطی را با کنترل‌گر ترکیبی H_2/LQG انجام داده و عملکرد آن را توسط فیلترهای فرکانسی بهبود بخشیدند [5]. در پژوهش دیگری، کنترل نیمه‌فعال سازه‌ای غیرخطی تجهیز شده با میراگرهای MR، تحت زلزله برر سی و در آن از مدل معکوس فازی تاکاگی-سوگینو^۲ برای تعیین ولتاژ مانند فرمان کنترل‌گر LQG، در میراگرها استفاده شد [6]. ونگ و دایک نیز یک سیستم هوشمند برای ارتقاء عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های جداسازی شده در پایه با استفاده از ترکیب استراتژی کنترل مودال LQG و ابزارهای هوشمند مانند میراگرهای MR طراحی نمودند [7]. کاربردهای متنوع دیگر کنترل‌گر LQG در پژوهش‌های اخیر قابل ملاحظه است. در سال ۲۰۱۴، یک کنترل‌گر تلفیقی از کنترل مدل داخلی و کنترل PID طراحی شد که بر مبنای استراتژی تنظیم‌گری LQG است [8]. در حقیقت پارامترهای حساسیت این کنترل‌گر ابداعی بر اساس پارامترهای حساسیت کنترل‌گر بهینه LQG تنظیم می‌شود. در سال ۲۰۱۵، کن و همکارانش با بهره‌گیری از استراتژی کنترل خطی درجه دوم گوسی گسسته زمانی، یک کنترل تطبیقی دومنظوره طراحی کردند، که قابلیت کنترل سیستم‌هایی را دارند که دارای عدم قطعیت‌های نامعلوم-ولی کران‌دار^۳ هم در معادلات حالت و هم در معادلات خروجی یا اندازه‌گیری هستند. کنترل دومنظوره به کنترل‌گری اشاره دارد که علاوه بر حالت سیستم، بر کیفیت تقریب به دست آمده از معادلات خروجی نیز تأثیر می‌گذارد [9]. به تازگی نیز در پژوهشی، به منظور کنترل ارتعاشات توربین بادی، تحت اثر تغییرات سرعت باد، از تلفیق کنترل LQG و کنترل پیش‌بین مدل، بهره گرفته شد. این کنترل‌گرها بر مبنای دو مدل دینامیک خطی متفاوت که در حوزه‌های عملکردی متفاوت عمل می‌کنند، طراحی شدند [10].

در کنترل LQG متداول، که تاکنون در پژوهش‌های مختلف، از جمله در [2-10]، بهره گرفته شده، بارهای محیطی و نوفه‌ها، به سبب ماهیت تصادفی‌شان، در هنگام اعمال نیروی کنترل قابل اندازه‌گیری نخواهند بود. از اینرو، در دستیابی نیروی کنترل لحاظ نمی‌شوند. این مسئله نقطه ضعف روش‌های کنترل LQG متداول

5 Qian

6 Adaptive Dual Control

7 Unknown-but-Bounded Uncertainty

1 Ryan

2 Takagi-Sugeno

3 Wang

4 Dyke

می‌شود و از حل معادله گسسته ریکاتی، که در ذیل آمده، به دست می‌آید:

$$P = A^T \left[P - PB(R + B^T PB)^{-1} B^T P \right]^{-1} A + Q \quad (7)$$

این نیروی کنترل مشابه فرمان کنترل LQR محاسبه می‌شود، با این تفاوت که به جای استفاده از حالت کامل و واقعی سیستم در لحظه جاری z_k ، از بردار حالت تقریبی بهینه \hat{z}_k ، بهره می‌گیرد. این بردار حالت تقریبی \hat{z}_k ، به وسیله روش فیلتر کالمن و با رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$\hat{z}_{k+1} = A\hat{z}_k + Bu_k + K_f(y_k - C\hat{z}_k) \quad (8)$$

که K_f بهره فیلتر کالمن نامیده شده و با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K_f = AP_f C^T [R_v + CP_f C^T]^{-1} \quad (9)$$

که P_f ماتریس مثبت نیمه معین، از حل معادله گسسته ریکاتی زیر به دست می‌آید:

$$P_f = A \left[P_f - P_f C^T (R_v + CP_f C^T)^{-1} CP_f \right] A^T + EQ_w E^T \quad (10)$$

۲-۲- استراتژی جدید کنترل بهینه خطی گوسی

در استراتژی کنترل جدید پیشنهادی، متغیر جدید q_k به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$q_k = Bu_k + Ew_k \quad (11)$$

با تعریف این بردار حالت جدید، که دربرگیرنده نیروی کنترل و آشفتگی‌های غیرقابل اندازه‌گیری مانند شتاب زمین است، معادله اولیه سیستم به فرم زیر تغییر می‌کند:

$$z_{k+1} = Az_k + q_k \quad (12)$$

با کسر متغیر q_k از q_{k+1} نتیجه زیر حاصل می‌گردد:

$$q_{k+1} - q_k = B \Delta u_k + E \Delta w_k \quad (13)$$

و از اینرو داریم:

$$q_{k+1} = q_k + B \Delta u_k + E \Delta w_k \quad (14)$$

ترکیب روابط (۱۲) و (۱۴) به معادلات فضای حالت جدید زیر منجر خواهد شد:

$$\begin{pmatrix} z_{k+1} \\ q_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A & I \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{pmatrix} z_k \\ q_k \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} \Delta u_k + \begin{bmatrix} 0 \\ E \end{bmatrix} \Delta w_k \quad (15)$$

موقعیت محرک‌ها است. $w(t)$ بردار بار یا آشفتگی محیطی مانند شتاب حرکت زمین، $\dot{x}_g(t)$ ، و F ماتریس موقعیت بارهای محیطی (برابر منفی ماتریس جرم، $-M$ در این مقاله) است. فرم گسسته زمانی معادلات دینامیک سازه در فضای حالت، با روابط زیر نشان داده شده‌اند:

$$z_{k+1} = A z_k + B u_k + E w_k \quad (2)$$

$$y_k = C z_k + v_k \quad (3)$$

که z_k ، u_k ، w_k ، y_k و v_k به ترتیب فرم‌های گسسته بردارهای حالت، نیرو، بارهای محیطی، خروجی سنسجش و نوفه اندازه‌گیری در گام زمانی t_k (یعنی $t_k = k \Delta t$) هستند. در این مقاله، بارهای محیطی w_k (زلزله) و نیز بردار نوفه اندازه‌گیری v_k ، به صورت فرآیندهای نوفه سفید^۱ با میانگین صفر و به ترتیب با واریانس $E\{w_k w_k^T\} = R_w \delta_{kj}$ و $E\{v_k v_k^T\} = R_v \delta_{kj}$ و $Q_w \delta_{kj}$ ماتریس‌های A ، B و C فرم گسسته ماتریس‌های انتقال سیستم پیوسته، نیروی کنترل، اندازه‌گیری و انتقال بار محیطی است. در ادامه نخست، ساختار کنترل‌گر متداول LQG و چگونگی محاسبه فرمان آن بررسی می‌شود و در ادامه کنترل‌گر پیشنهادی این پژوهش، که تغییر یافته LQG متداول است، ارائه خواهد شد.

۲-۱- کنترل بهینه خطی گوسی متداول

شاخص عملکرد مناسب برای کنترل‌گر LQG متداول، که برای بهینه‌سازی عملکرد کنترلی کمینه خواهد شد، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N (z_k^T Q z_k + u_k^T R u_k) \quad (4)$$

که Q ماتریس وزنی حالت مثبت نیمه معین و R ماتریس وزنی کنترل مثبت نیمه معین هستند. با انجام روند بهینه‌سازی، نیروی کنترل به صورت زیر می‌شود:

$$u_k = -K \hat{z}_k \quad (5)$$

که در آن K ماتریس بهره پسخور تناسبی از حالت سیستم بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K = [R + B^T P B]^{-1} B^T P A \quad (6)$$

که P ماتریس ریکاتی^۲ که مقارن و مثبت معین است، نامیده

در این مطالعه، دو شیوه برای دستیابی به کنترل‌گر نهایی پیشنهاد می‌شود. در شیوه نخست، جایگزینی متغیرهای اولیه در رابطه (۲۳)، به عبارت زیر منجر می‌شود:

$$\Delta u_k = -[K_1 \quad K_2] \begin{pmatrix} \hat{z}_k \\ \hat{q}_k \end{pmatrix} \quad (26)$$

با استفاده از رابطه ۱۲، و مرتب سازی داده‌های تخمینی فیلتر کالمن اولیه، عبارت زیر را خواهیم داشت:

$$\hat{q}_k = \hat{z}_{k+1} - A \hat{z}_k \quad (27)$$

با قرارگیری رابطه (۲۷) در رابطه (۲۶)، فرمان کنترل به فرم زیر می‌شود:

$$u_{k+1} - u_k = -K_1 \hat{z}_k - K_2 (\hat{z}_{k+1} - A \hat{z}_k) \quad (28)$$

اکنون می‌توان بردار حالت تخمینی \hat{z}_{k+1} در رابطه فوق را با مقدار تخمین زده از رابطه (۸)، که همان معادله فیلتر کالمن متداول (CKF) است، جابه‌جا نمود و پس از مرتب‌سازی عبارات رابطه (۲۸)، به رابطه زیر دست یافت:

$$u_{k+1} = (I - K_2 B) u_k + (K_2 K_f C - K_1) \hat{z}_k - K_2 K_f y_k \quad (29)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود این فرمان کنترلی برای گام زمانی $k+1$ ارائه شده، پس نیروی کنترل لحظه k با انتقال زمان $k+1$ به k در رابطه فوق به دست می‌آید:

$$u_k = K_u u_{k-1} + K_z \hat{z}_{k-1} - K_y y_{k-1} \quad (30)$$

رابطه فوق صورت نهایی فرمان کنترل پیشنهادی نخست است. K_u ، K_z و K_y ماتریس‌های بهره تناسبی از نیروی کنترل گام پیشین u_{k-1} (بهره پیشخور)، حالت تقریبی گام پیشین \hat{z}_{k-1} ، خروجی سنجش همان گام y_{k-1} (بهره پسخور) هستند:

$$K_u = I - K_2 B, K_z = K_2 K_f C - K_1, K_y = -K_2 K_f \quad (31)$$

در این روش کنترلی، در کنار تغییر یا بهبود کنترل‌گر LQG، از فیلتر کالمن متداول (CKF) برای تخمین بهینه حالت سیستم بهره گرفته می‌شود. در شیوه دوم، بدون جایگزینی تمام متغیرهای اولیه در فرمان کنترلی اشاره شده در رابطه (۲۳)، فقط با تعویض متغیر جدید نیروی کنترل، \bar{u}_k ، با تفاضل نیروی کنترل در دو گام زمانی متوالی، Δu_k ، طبق تعاریف آمده در رابطه (۱۷)، عبارت زیر نتیجه اینگونه خواهد شد:

$$y_k = [C_{n \times 2n} \quad 0_{n \times 2n}] \begin{pmatrix} z_k \\ q_k \end{pmatrix} + v_k \quad (16)$$

که n تعداد طبقات سازه است. پارامترهای جدید به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\bar{z}_k = \begin{pmatrix} z_k \\ q_k \end{pmatrix}, \bar{u}_k = \Delta u_k, \bar{w}_k = \Delta w_k, \bar{y}_k = y_k, \bar{v}_k = v_k \quad (17)$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & I \\ 0 & I \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix}, \bar{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ E \end{bmatrix}, \bar{C} = [C_{n \times 2n} \quad 0_{n \times 2n}] \quad (18)$$

پس معادلات فوق به فرم زیر ساده می‌شوند:

$$\bar{z}_{k+1} = \bar{A} \bar{z}_k + \bar{B} \bar{u}_k + \bar{E} \bar{w}_k \quad (19)$$

$$\bar{y}_k = \bar{C} \bar{z}_k + \bar{v}_k \quad (20)$$

که بردار نوفه اندازه‌گیری، \bar{v}_k ، همان بردار نوفه در رابطه (۳) است با همان مشخصه آماری، یعنی $E\{v_k v_k^T\} = R_v \delta_{kj}$ ، ولی آشفتگی \bar{w}_k (یعنی تغییرات تحریک در هر بازه زمانی) به یک فرآیند نوفه سفید با متوسط صفر و با واریانس $E\{\bar{w}_k \bar{w}_k^T\} = 2Q_w \delta_{kj}$ تغییر می‌یابد.

اکنون شاخص عملکرد جدید زیر معرفی می‌شود:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N-1} (\bar{z}_k^T \bar{Q} \bar{z}_k + \bar{u}_k^T \bar{R} \bar{u}_k) \quad (21)$$

که در آن \bar{Q} و \bar{R} ماتریس‌های وزنی حالت و نیروی کنترل برای معادلات فضای حالت جدید و بنا به تعریف زیر دارای اثر همان ماتریس‌های Q و R در رابطه ۴ هستند:

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{R} = R \quad (22)$$

اثر شاخص عملکرد فوق مشابه شاخص عملکرد در رابطه (۴) است. روابط ۱۹ تا ۲۱ به یک مسئله کنترل‌گر LQG جدید منجر شده و می‌توان فرمان کنترل جدیدی به طریق زیر بدست آورد:

$$\bar{u}_k = -\bar{K} \hat{\bar{z}}_k \quad (23)$$

که در آن \bar{K} ماتریس بهره پسخور تناسبی کنترل‌گر LQR بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{K} = [\bar{R} + \bar{B}^T \bar{P} \bar{B}]^{-1} \bar{B}^T \bar{P} \bar{A} \quad (24)$$

و ماتریس \bar{P} از معادله گسسته ریکاتی زیر بدست می‌آید:

$$\bar{P} = \bar{A}^T \left[\bar{P} - \bar{P} \bar{B} (\bar{R} + \bar{B}^T \bar{P} \bar{B})^{-1} \bar{B}^T \bar{P} \right]^{-1} \bar{A} + \bar{Q} \quad (25)$$

(۱۹۹۵) و دو زلزله حوزه دور از گسل، شامل ال‌سترو (۱۹۴۰) و هاجینوهه (۱۹۶۸) بررسی می‌شود. در جدول (۱) و شکل (۱)، مشخصات و نمودار شتاب نگاشت زلزله‌ها آمده است. همه شبیه‌سازی‌ها تحت نرم افزار MATLAB انجام پذیرفته است. تمامی فرآیند پردازش، حل معادله دینامیکی، اعمال نیروی کنترل و سنجش یا نمونه‌برداری داده‌های خروجی سیستم در گام‌هایی با بازه زمانی $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ اجرا شده‌اند. سیستم ساختمانی سازه مطالعه شده یک قاب ساختمانی برشی دو دهانه با هفت طبقه است. ارتفاع هر طبقه ۴ متر و طول هر دهانه ۹ متر است. دیافراگم سقف به صورت صلب و سختی تیرهای هر طبقه بسیار بزرگتر از سختی ستون‌ها لحاظ شده‌اند، به گونه‌ای که رفتار هر ستون مانند یک تیر دو سر گیردار قابل مدل سازی است شکل (۲). مشخصات دینامیکی این سازه شامل جرم و سختی توسط ماتریس‌های جرم و سختی زیر بیان می‌شود:

$$K = \begin{bmatrix} 29.28 & -14.64 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -14.64 & 31.59 & -16.95 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -16.95 & 30.96 & -14.01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -14.01 & 28.02 & -14.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -14.01 & 25.13 & -11.12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -11.12 & 22.24 & -11.12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -11.12 & 11.12 \end{bmatrix} \times 10^7 \text{ (N/m)}$$

$M = 8.75 \times 10^4 \text{ I}_{7 \times 7} \text{ kg}$

که I ماتریس قطری واحد است.

نسبت میرایی برای سازه بدون کنترل برابر ۵ درصد است. ابزارهای کنترل فعال شامل میراگرهای نصب شده به طور افقی بین مهاربندهای شورون هشتی شکل و دیافراگم سقف یا تیر در هر طبقه از سازه، است.

جدول ۱: مشخصات زلزله‌های مطالعه شده

Earthquake	Year	Station	Magnitude (Mw)	PGA (g)	Fault
Northridge	1994	SYLMAR - COUNTY HOSP.	6.7	0.843	Near
Kobe	1995	KJMA	6.8	0.821	Near
El Centro	1940	IMPERIAL VALLEY	6.9	0.349	Far
Hachinohe	1968	JAPAN-HACHINOHE-S252	7.5	0.229	Far

Table 1: Properties of studied earthquakes

$$u_{k+1} = u_k - \bar{K} \hat{z}_k \quad (32)$$

در این مرحله دوباره با انتقال زمان $k+1$ به k در رابطه فوق، نیروی کنترل لحظه k به دست می‌آید:

$$u_k = u_{k-1} - \bar{K} \hat{z}_{k-1} \quad (33)$$

رابطه فوق صورت نهایی فرمان کنترل پیشنهادی دوم است. در آن ضمن بهبود کنترل گر LQG، حالت تقریبی بهینه \hat{z}_k از معادله جدید فیلتر کالمن زیر، که مبتنی بر معادلات فضای حالت جدید (۱۹ و ۲۰) بوده و فیلتر کالمن اصلاحی (MKF) نامیده می‌شود، به دست می‌آید:

$$\hat{z}_{k+1} = \bar{A} \hat{z}_k + \bar{B} \bar{u}_k + \bar{K}_f (\bar{y}_k - \bar{C} \hat{z}_k) \quad (34)$$

در این رابطه، بهره فیلتر کالمن اصلاحی (MKF)، است و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\bar{K}_f = \bar{A} \bar{P}_f C^T [R_v + C \bar{P}_f C^T]^{-1} \quad (35)$$

و ماتریس \bar{P}_f از حل معادله ریکاتی زیر بدست می‌آید:

$$\bar{P}_f = A \left[\bar{P}_f - \bar{P}_f C^T (R_v + C \bar{P}_f C^T)^{-1} C \bar{P}_f \right] A^T + E Q_w E^T \quad (36)$$

لازم است برای بهره‌گیری از تخمین بهینه حالت در لحظه $k-1$ ، \hat{z}_{k-1} در فرمان کنترلی رابطه (۳۳)، رابطه (۳۴) برای لحظه $k-1$ بازنویسی شود.

۳- تحلیل عددی

در این بخش سیستم کنترل فعال برای سازه قابی هفت طبقه به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم کنترل پیشنهادی مطالعه می‌شود. در تحلیل حوزه زمانی، پاسخ لرزه‌ای سازه و نیروی کنترل تحت شتاب نگاشت دو زلزله حوزه نزدیک گسل، شامل نورتریج (۱۹۹۴) و کوبه

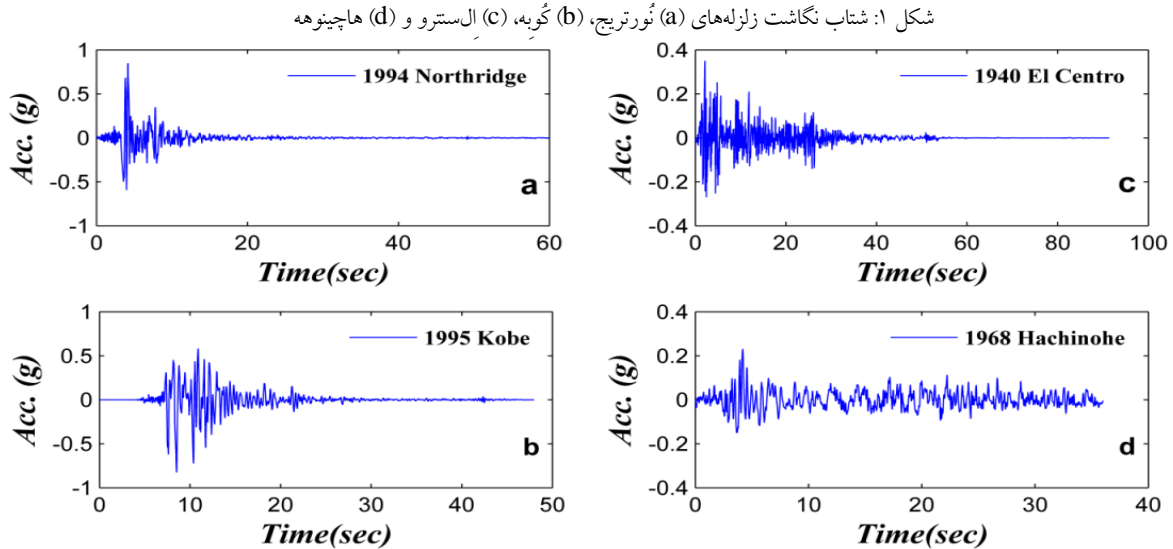


Fig. 1. Earthquake accelerograms (a) Northridge, (b) Kobe, (c) El Centro, and (d) Hachinohe

شکل ۲: سازه قابی هفت طبقه مجهز به ابزارهای کنترل فعال

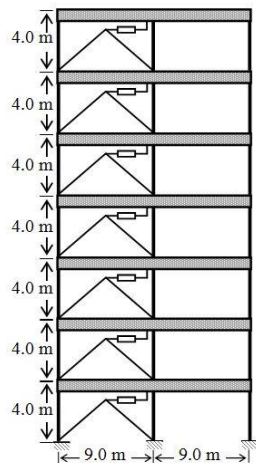


Fig. 2. 7-Story frame with active control actuators

تحلیل‌های عددی در مورد این سازه تحت تحریک زلزله، در چهار حالت انجام گرفته و نتایج آنها برای تعیین عملکرد کنترلی بهتر با یکدیگر مقایسه می‌شوند. این چهار حالت عبارتند از: سازه کنترل نشده، سازه کنترل شده به وسیله کنترل گر LQG متداول همراه با تخمین گر فیلتر کالمن متداول (CKF)، سازه کنترل شده به وسیله کنترل گر LQG اصلاحی به همراه تخمین گر فیلتر کالمن متداول (CKF)، و در نهایت سازه کنترل شده به وسیله کنترل گر LQG اصلاحی به همراه تخمین گر فیلتر کالمن اصلاحی (MKF). در ادامه این مقاله، دو کنترل گر پیشنهادی اخیر به اختصار و به ترتیب با MLQG1 و MLQG2 اشاره می‌شوند. همچنین بزرگای

هفت محرک^۱ یا راه‌انداز و هر کدام در یک طبقه نصب شده‌اند، از اینرو، ماتریس توزیع موقعیت نیروهای کنترل، D یک ماتریس 7×7 بعدی به فرم زیر است:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ماتریس‌های وزنی حالت و نیروی سیستم به صورت زیر

انتخاب شده‌اند:

$$Q = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix}, \quad R = K^{-1} \times 10^7$$

که r پارامتر کنترلی است و برای تنظیم نیروی کنترل سیستم سازه در محدوده‌ای عملیاتی به کار می‌رود. برای کمیته‌سازی تابع شاخص عملکرد، انتخاب دقیق و مناسب پارامتر کنترلی r لازم است به گونه‌ای باشد که بیشترین تأثیر در سیستم کنترل فراهم شود، از اینرو، بر اساس تحلیل حساسیتی که شرح آن در ادامه این پژوهش خواهد آمد، این پارامتر برابر عدد ۲ انتخاب شده است.

می‌دهند که در اغلب زلزله‌ها، به غیر از زلزله کوبه، کمترین مقدار برای مجموع نیروهای کنترل در اغلب بازه‌های زمانی به وسیله کنترل گر LQG به دست می‌آید. حال آنکه کنترل گر MLQG1 بیشترین نیروها را برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه فراهم می‌کند، البته نیروهای کنترل گر MLQG2 به مقادیر نظیر کنترل گر LQG بسیار نزدیک و برای زلزله کوبه کمترین مقدار هستند. در شکل (۵)، مجموع یا کل انرژی کنترل نسبی (TCE) اعمال شده به وسیله تمام محرک‌های طبقات تحت هر یک از زلزله‌ها، به عبارت دیگر کار مفید مجموع انجام شده تا هر لحظه توسط نیروی نسبی محرک‌ها نسبت به وزن سازه آمده است. برای بدست آوردن انرژی کنترل به وسیله محرک کتتری در هر طبقه، $C_i E_i$ ، از رابطه زیر بهره گرفته می‌شود:

$$C_i E_i = - \int_{t=0}^{t=t_k} u_i dx_i = - \int_{t=0}^{t=t_k} u_i v_i dt = \left(\sum_{j=0}^k u_{ji} v_{ji} \right) \Delta t \quad (37)$$

که v_{ji} سرعت طبقه i ام و در گام زمانی j و u_{ji} فرمان کنترل یا تلاش کتتری در همان طبقه و در گام زمانی j است. شکل (۵) نشان می‌دهد که کنترل گر MLQG2 کمترین مقدار انرژی و کنترل گر MLQG1 بیشترین مقدار انرژی را برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه تولید می‌کند. از اینرو، عملکرد مناسبتر کتتری به کنترل گر MLQG2 اختصاص دارد. البته انرژی کل اعمال شده به وسیله دو کنترل گر LQG و MLQG2 در زلزله‌های نورتریج، ال‌سترو و هاجینوهه نزدیک به هم بوده و بیشترین اختلاف را تحت زلزله کوبه دارند، به گونه‌ای که میزان کاهش انرژی اعمالی به وسیله MLQG2 نسبت به LQG برابر ۹۰ درصد است.

در شکل (۶)، جذر میانگین مربعات (RMS) پاسخ‌های نرمال شده جابه‌جایی، شتاب و نیروی کنترل برای همه طبقات سازه آمده است. پاسخ‌های جابه‌جایی و شتاب طبقات سازه کنترل شده با تقسیم بر پاسخ جابه‌جایی و شتاب طبقه اول سازه کنترل نشده، نرمال می‌شوند. همچنین نیروی کنترل طبقات با تقسیم بر نیروی تولید شده به وسیله محرک طبقه اول سازه تحت کنترل گر LQG، نرمال می‌شود. مقادیر به دست آمده شکل‌های (a, e, i) تحت زلزله نورتریج، شکل‌های (b, f, j)

واریانس‌های آشفتگی محیطی، Q_{ii} و نوفه اندازه‌گیری سیستم، R_{vv} به معنای شدت پراکندگی آشفتگی‌ها بر سیستم بوده و سبب کاهش عملکرد مطلوب کنترل‌گرها خواهند بود. از اینرو، ثبات و مقاوم بودن عملکرد کنترل گر تحت محدوده وسیعتر تغییرات واریانس آشفتگی‌ها، خود معیاری برای پایداری و مقاومت و در نتیجه شاخص عملکرد مناسب آن خواهد بود. از اینرو، در این پژوهش اثر بزرگای واریانس‌های آشفتگی محیطی و نوفه اندازه‌گیری بر پاسخ لرزه‌ای سازه کنترل شده نیز مطالعه شده است. پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی‌های طبقه بام در سازه هفت طبقه تحت زلزله‌های نورتریج، کوبه، ال‌سترو و هاجینوهه، تا زمان ۲۰ ثانیه نخست، برای چهار حالت کتتری یاد شده در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. این پاسخ‌ها به ازای $Q_{ii}=10$ و $R_{vv}=1$ در شکل (۳) ارائه شده‌اند. در این محدوده زمانی شدیدترین تکانش ناشی از زلزله را شاهد هستیم، در حالیکه در زمانهای فراتر از ۲۰ ثانیه، از شدت پاسخ لرزه‌ای سازه کاسته شده و رفتار میرایی در آن بروز می‌کند. پاسخ لرزه‌ای سازه کنترل نشده، و سازه‌های کنترل شده به وسیله کنترل گرهای LQG، MLQG1 و MLQG2 به ترتیب به صورت نقطه‌چین (آبی)، خط ممتد باریک (مشکی)، خط چین (سبز) و خط ممتد ضخیم (قرمز) نمایش داده شده‌اند. در شکل (۳)، مشاهده می‌شود که بیشترین کاهش در پاسخ لرزه‌ای سازه به ترتیب با اعمال کنترل‌گرهای MLQG2 و MLQG1 صورت می‌گیرد ولی پاسخ لرزه‌ای سازه کنترل شده به وسیله LQG نزدیک به پاسخ سازه کنترل نشده است. همچنین بیشینه جابه‌جایی‌های طبقه اول سازه کنترل گرهای LQG و MLQG1 بر جابه‌جایی بیشینه طبقه اول سازه کنترل نشده تحت اغلب زلزله‌های دور و نزدیک گسل هماهنگی دارند، در حالیکه کمینه جابه‌جایی بیشینه تحت کنترل گر MLQG2 حاصل آمده است. در شکل (۴)، مجموع یا کل نیروهای کنترل نسبی (TCF) تولید شده در تمام محرک‌های نصب شده در طبقات سازه تحت زلزله‌های نورتریج، کوبه، ال‌سترو و هاجینوهه، برای چهار حالت کتتری یاد شده، به ازای $Q_{ii}=10$ و $R_{vv}=1$ نشان داده شده‌اند. طبق تعریف نیروی کنترل نسبی برابر نسبت بی‌بعد مقدار واقعی نیروی کنترل محرک به وزن کل سازه است. نتایج نشان

کنترل نشده طبقات به و سیله این سه کنترل گر محقق می شود. بنابراین کمینه بودن پاسخ‌های جابه‌جایی و شتاب در هفت طبقه سازه تحت کنترل گر MLQG2 در اغلب زلزله‌ها قابل رویت است. نیروهای کنترل تولید شده به و سیله LQG و MLQG2 در طبقات دوم تا هفتم سازه به یکدیگر نزدیک بوده ولی در طبقه اول نیروی کنترل LQG در حدود ۲ تا ۴ برابر نیروی کنترل MLQG2 است. کنترل گر MLQG1 پاسخ‌های جابه‌جایی و شتاب کمتر و نیروی کنترل بزرگتر نسبت به LQG ایجاد می‌کند، البته در زلزله‌های نورتریج و هاجینوه کمترین شتاب به وسیله کنترل گر LQG حاصل شده است.

تحت زلزله کُوبه، شکل‌های (g, c, k) تحت زلزله ال‌سنسترو، و شکل‌های (d, h, l) تحت زلزله هاجینوه است. مشاهده می‌شود که برای اغلب زلزله‌ها، جابه‌جایی طبقه اول تا بام سازه تحت کنترل‌گرهای MLQG2، MLQG1 و LQG به ترتیب در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد، ۵۰ تا ۷۰ درصد و ۸۰ تا ۸۵ درصد جابه‌جایی کنترل‌نشده مانند همان طبقات است. همچنین شتاب طبقه اول تا بام سازه تحت همین کنترل‌گرها برای دو زلزله کوبه و ال‌سنسترو به ترتیب در حدود ۴۰ تا ۷۰ درصد، ۶۰ تا ۸۵ درصد و ۸۰ تا ۱۰۰ درصد شتاب کنترل‌نشده مانند همان طبقات هستند و در مورد دو زلزله دیگر ۸۰ تا ۱۰۰ درصد شتاب

شکل ۳: جابه‌جایی بام سازه تحت زلزله‌های (a) نورتریج، (b) کُوبه، (c) ال‌سنسترو، (d) هاجینوه ($R_v=1, Q_w=10$)

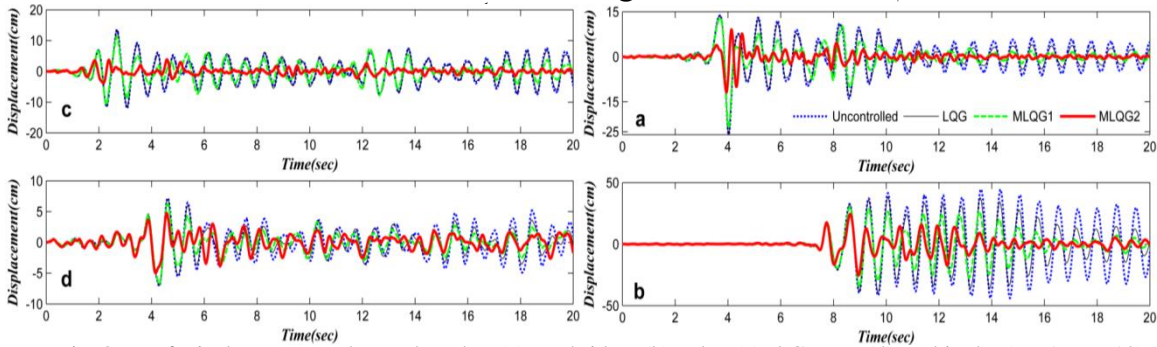


Fig. 3. Roof Displacement under earthquakes (a)Northridge, (b)Kobe, (c)El Centro, (d)Hachinohe ($R_v=1, Q_w=10$)

شکل ۴: مجموع نیروهای کنترل نسبی طبقات تحت زلزله‌های (a) نورتریج، (b) کُوبه، (c) ال‌سنسترو، (d) هاجینوه ($R_v=1, Q_w=10$)

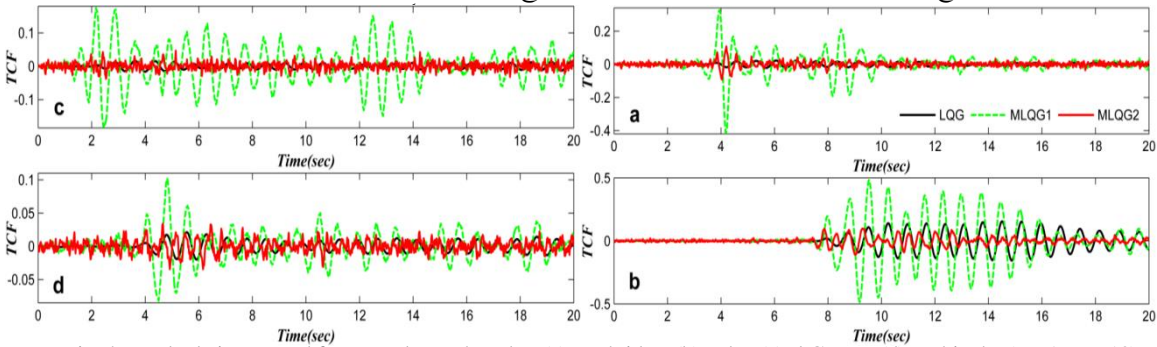


Fig. 4. Total relative control forces under earthquakes (a)Northridge, (b)Kobe, (c)El Centro, (d)Hachinohe ($R_v=1, Q_w=10$)

شکل ۵: مجموع انرژی کنترل نسبی طبقات سازه تحت زلزله‌های (a) نورتریج، (b) کُوبه، (c) ال‌سنسترو، (d) هاجینوه ($R_v=1, Q_w=10$)

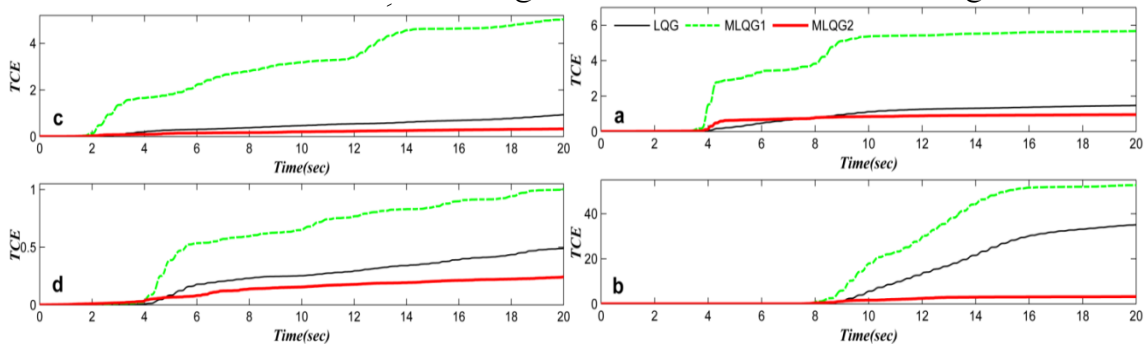


Fig. 5. Total relative control energies under earthquakes (a)Northridge, (b)Kobe, (c)El Centro, (d)Hachinohe ($R_v=1, Q_w=10$)

MLQG2 همراهانند، پس این ویژگی بر پایداری و استواری آن تحت تغییرات گسترده عدم یقین‌ها دلالت دارد. از سوی دیگر، مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار α ضمن کاهش دو شاخص، حساسیت آنها نیز در برابر تغییر نوفه اندازه‌گیری R_v کاهش می‌یابد. به‌ایزای مقادیر بزرگتر r (۳ و ۴) عملکرد کنترل‌گرها به ویژه LQG و MLQG2 ضعیف است. زیرا دو شاخص مورد اشاره کوچک و نزدیک به صفر می‌شود و حتی در صد کاهش برای زلزله هاجینوهه و $Q_w=0.1$ منفی شده، که به معنی بیشتر شدن جابه‌جایی بیشینه بام سازه کنترل شده نسبت به سازه کنترل نشده است. به‌ایزای ۲ و ۱ $r=1$ نیز این دو شاخص مقادیر بزرگی را اختیار می‌کنند. از اینرو، گزینه $\alpha=2$ برای ارائه مقادیر مطلوبی برای شاخص‌ها، و در عین حال حساسیت کم در برابر پارامتر نوفه اندازه‌گیری R_v انتخاب مناسبی به نظر می‌رسد.

۴- نتیجه‌گیری

بر مبنای تئوری کنترل بهینه متداول، آشفستگی‌ها و بارهای محیطی، به سبب عدم قابلیت اندازه‌گیری همزمان با اعمال نیروی کنترل، در فرآیند کمینه‌سازی شاخص عملکردی و به تبع آن در محاسبه فرمان کنترلی داخل نشده‌اند.

در این مقاله، برای حل این مشکل، با تعریف متغیر حالت جدید، که در برگیرنده نیروی کنترل و تحریک توأم است، دو استراتژی کنترل جدید یا الگوریتم اصلاح شده بر مبنای کنترل بهینه خطی درجه دوم گوسی برای کنترل سازه‌ها پیشنهاد شد.

در MLQG1، در کنار تنظیم‌گر LQR بهبود یافته، از فیلتر کالمن متداول (CKF) برای تعیین فرمان کنترل استفاده شد، حال آنکه در MLQG2، فیلتر کالمن بهبود یافته (MKF) نیز به کار رفت. با تحلیل حوزه زمانی برای سازه هفت طبقه تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل و کنترل شده به وسیله سه کنترل‌گر، بهترین عملکرد به وسیله MLQG2، با توجه به مقادیر کمینه پاسخ لرزه‌ای (جابه‌جایی و شتاب)، و نیرو و انرژی کنترل، به صورت با هم، مشاهده شد. البته

نتیجه آنکه به سبب پاسخ‌های نزدیک به وضعیت کنترل نشده سازه به وسیله LQG و نیروهای کنترل بزرگ تولید شده به وسیله MLQG1، این دو کنترل‌گر در برابر MLQG2 دارای عملکرد ضعیف‌تری هستند.

در ادامه به منظور بررسی کارآمدی کنترل‌گرها، حساسیت دو شاخص یا معیار عملکردی نسبت به تغییرات پارامترهای α و Q_w و R_v تحلیل و ارزیابی می‌شود. شاخص نخست عبارت است از درصد کاهش جابه‌جایی (DRP) بیشینه بام سازه کنترل شده نسبت به سازه کنترل نشده، که با رابطه زیر ارائه می‌شود:

$$DRP = \frac{MAX_{Uncon. Disp.} - MAX_{Con. Disp.}}{MAX_{Uncon. Disp.}} \times 100\% \quad (38)$$

و شاخص دوم، مجموع انرژی کنترل نسبی (TCE) اعمالی به وسیله تمام محرک‌های طبقات است. نمودار دو شاخص مذکور در شکل‌های (۷ و ۸) بر حسب پارامتر کنترلی r در گستره ۱ تا ۴ و در ایزای مقادیر ۰/۱، ۱ و ۱۰ برای پارامترهای آشفستگی Q_w و R_v تحت ۴ زلزله رسم شده‌اند. برای نمودارهای هر ستون مقدار Q_w ثابت است. پاسخ کنترل‌گرهای LQG، MLQG1 و MLQG2 به ترتیب به صورت نقطه‌چین (مشکی)، خط‌چین (سبز) و خط ممتد (قرمز) و ضخامت خطوط متناسب با افزایش R_v نمایش داده شده‌اند. این نمودارها نشان می‌دهند که افزایش Q_w و کاهش R_v سبب کاهش بیشتر در جابه‌جایی بیشینه بام و افزایش انرژی کنترل می‌شوند. همچنین بیشترین درصد کاهش جابه‌جایی و کمترین انرژی کنترلی مصرفی به وسیله MLQG2 محقق می‌شود، به گونه‌ای که در اغلب زلزله‌ها کاهش در بیشینه جابه‌جایی بین ۲۰ تا ۸۰ درصد و انرژی کنترل مصرفی بسیار کم و در حدود ۱۰ درصد بیشترین انرژی مصرفی (به وسیله کنترل‌گر MLQG1) است. حال آنکه کنترل‌گرهای LQG و MLQG1 به ترتیب کمترین درصد کاهش جابه‌جایی و بیشترین انرژی کنترل مصرفی را به ویژه در ایزای مقادیر ۲، ۳ و ۴ برای r ایجاد می‌نمایند. همچنین در اغلب زلزله‌ها، تغییر پارامترهای آشفستگی Q_w و R_v با تغییر اندک و مناسب شاخص‌ها در عملکرد

چشمگیر در پاسخ‌های سازه و نیروی کنترل تحت کنترل‌گر MLQG2 دیده شد. در نتیجه پایداری و استواری MLQG2 در برابر افزایش شدت و پراکندگی آشفتگی‌های محیطی و نوفه اندازه‌گیری، در قیاس با دو کنترل‌گر دیگر به اثبات رسید.

MLQG1 نسبت به LQG متداول در کاهش پاسخ سازه مؤثرتر ولی در تولید نیروی کنترل، ضعیف‌تر عمل کرد. با انجام تحلیل حساسیت روی دو شاخص درصد کاهش جابه‌جایی بیشینه بام و مجموع انرژی کنترل طبقات تحت ۴ زلزله دور و نزدیک به گسل، عدم تغییر

شکل ۶: جذر میانگین مربعات (RMS) پاسخهای نرمال شده جابجایی، شتاب و نیروی کنترل طبقات سازه تحت زلزله‌های (i.e.a) نورتریج، (j.f.b) کوبه، (k.g.c) ال‌سترو و (l.h.d) هاجینوهه ($R_v=1, Q_w=10$)

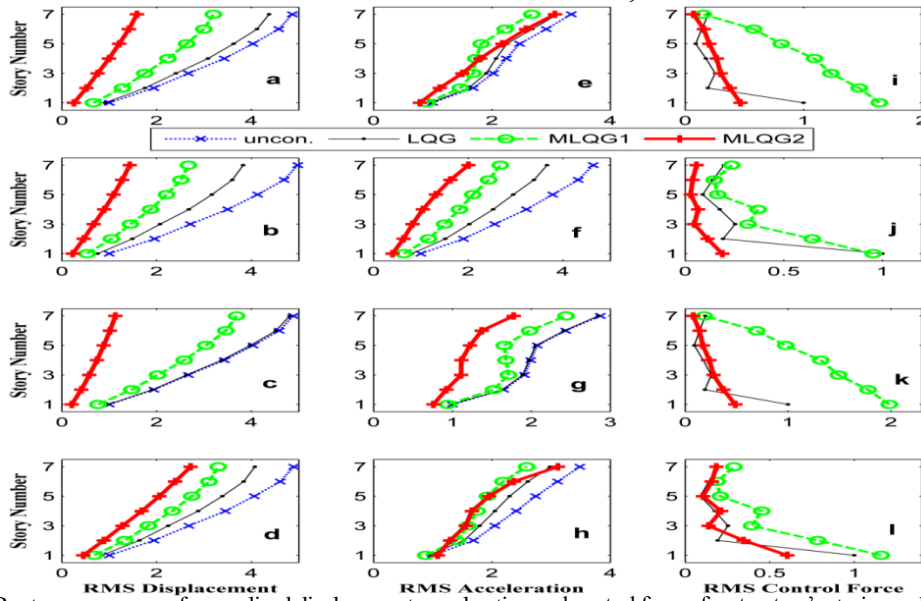


Fig. 6. Root mean squares of normalized displacement, acceleration and control forces for structure's stories under earthquakes (a, e, i) Northridge, (b, f, j) Kobe, (c, g, k) El Centro, (d, h, l) Hachinohe ($R_v=1, Q_w=10$)

شکل ۷: درصد کاهش جابه‌جایی بیشینه بام سازه کنترل نشده نسبت به کنترل نشده تحت زلزله‌های (i.e.a) نورتریج، (j.f.b) کوبه، (k.g.c) ال‌سترو و (l.h.d) هاجینوهه ($Q_w=0.1$)

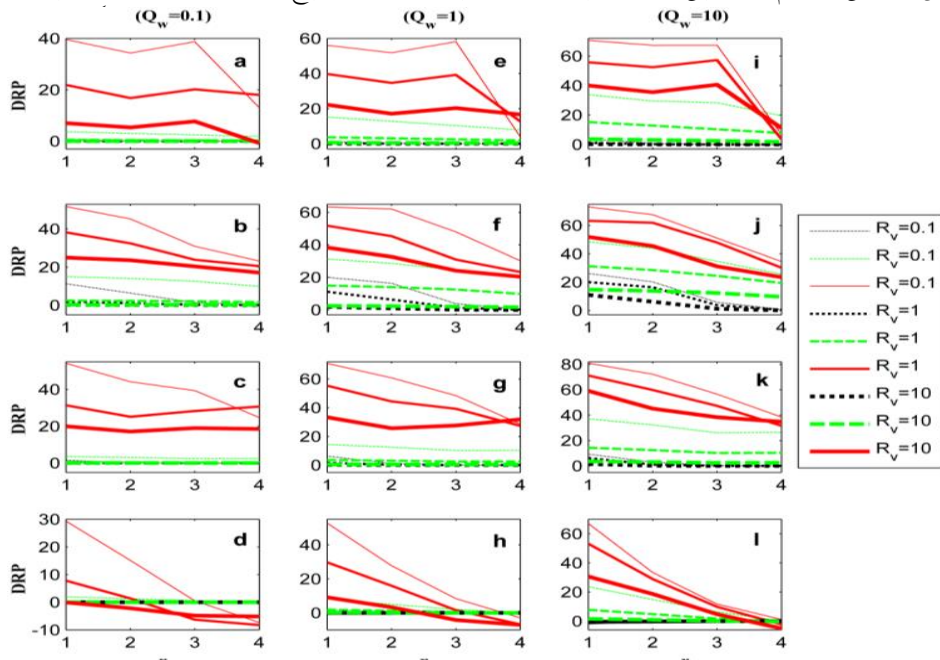


Fig. 7. Maximum roof displacement reduction percentage of controlled structure relative to uncontrolled structure under earthquakes (a, e, i) Northridge, (b, f, j) Kobe, (c, g, k) El Centro, (d, h, l) Hachinohe

شکل ۸: مجموع انرژی کنترل نسبی طبقات سازه کنترل شده تحت زلزله‌های (a, e, i) نورتریج، (b, f, j) کوبه، (c, g, k) ال‌سترو و (d, h, l) هاجینوه

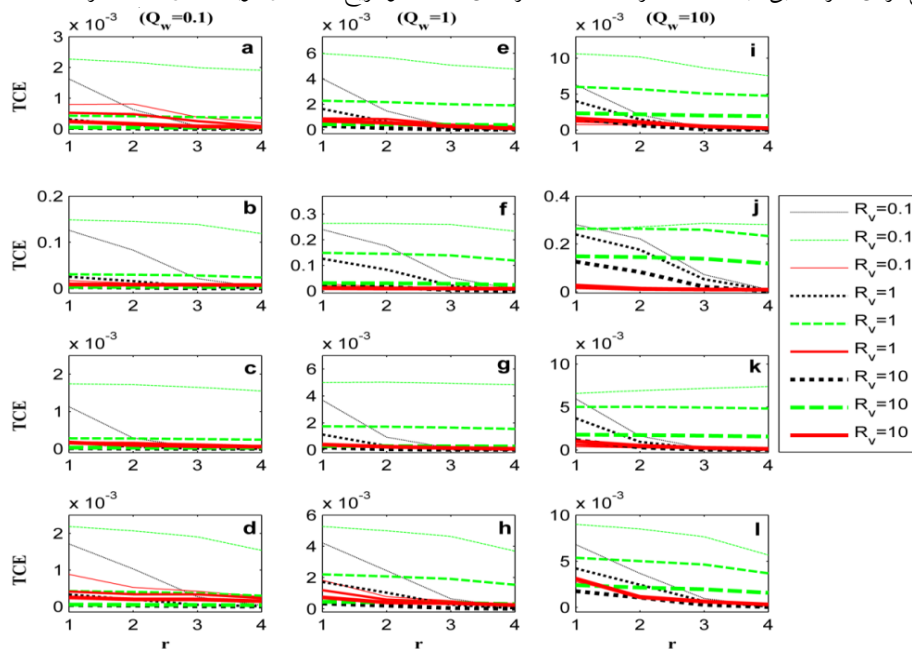


Fig. 8. Total relative control energies of controlled structure's stories under earthquakes (a, e, i) Northridge, (b, f, j) Kobe, (c, g, k) El Centro, (d, h, l) Hachinohe

[6] Askari M., Li J., Samali B. 2011 Semi-Active LQG Control of Seismically Excited Nonlinear Buildings using Optimal Takagi-Sugeno Inverse Model of MR Dampers. *Procedia Engineering*, 14, 2765–2772

[7] Wang Y., Dyke S. 2013 Modal-based LQG for Smart Base Isolation System Design in Seismic Response Control. *Structural Control and Health Monitoring*, 20(5), 753–768

[8] Jin Q., Liu L., 2014 Design of a Robust Internal Model Control PID Controller Based on Linear Quadratic Gaussian Tuning Strategy. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 92(7), 1260-1270.

[9] Qian F., Huang J., Liu D., Hu S. 2015 Adaptive Dual Control of Discrete-Time LQG Problems with Unknown-But-Bounded Parameter. *Asian Journal of Control*, 17(3), 942-951.

[10] Hur S., Leithead W.E. 2016 Model predictive and linear quadratic Gaussian control of a wind turbine. *Optimal Control Applications and Methods*, DOI: 10.1002/oca.2244

[11] Tabatabaiefar H.R., Fatahi B., Samali B. 2014 An empirical relationship to determine lateral seismic response

of mid-rise building frames under influence of soil-structure interaction. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23, 526-548.

[12] Yanik A., Aldemir U., Bakioglu M. 2014 A new active control performance index for vibration control of three-dimensional structures. *Engineering Structures*, 62, 53-64.

به گونه‌ای که بیشترین کاهش بیشینه جابه‌جایی (حتی تا ۸۰

در صد) و در عین حال، صرف انرژی بسیار کم (۱۰ در صد بیشینه انرژی کنترل مصرفی دیگر کنترل‌گرها) محقق می‌شود. بررسی اثر شدت پارامتر کنترلی یا ماتریس وزنی نیرو بر دو شاخص مذکور نیز منجر به انتخاب مقدار بهینه و مناسبی برای پارامتر کنترلی شد.

۵- مراجع

[1] Soong T.T. 1990 *Active Structure Control: Theory and Practice*. England, Longman Scientific and Technical.

[2] Gawronski W.K. 1998 *Dynamics and Control of Structures: A Modal Approach*, Springer-Verlag, New York.

[3] Gawronski, W.K. 1994 A Balanced LQG Compensator for Flexible Structures. *Automatica*, 30(10), 1555-1564.

[4] Wu J.C., Yang J.N. 2000 LQG control of lateral torsional motion of Nanjing TV transmission tower. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, 1111–1130

[5] Shafieezadeh A., Ryan K.L., 2011 Demonstration of robust stability and performance of filter-enhanced H_2 /LQG controllers for a nonlinear structure. *Structural Control and Health Monitoring*, 18, 710–720

Improvement in Seismic Control of Frame Structures Against Far-Fault and Near-Fault Earthquakes with New Strategy of Gaussian Linear Optimal Control

M. Amin Afshar^{1*}

1- Assist. Prof., Civil Eng. Dept., Faculty of Tech. and Eng., Imam Khomeini International University

*mafshar@eng.ikiu.ac.ir

Abstract:

In this paper, a modified linear-quadratic-Gaussian (MLQG) optimal control algorithm is proposed for controlling the seismic response of the frame structures. Environmental loads (e.g., earthquakes) cannot be measured at the moment of calculation and exertion of the control forces to the structures. So these loads are not included in the conventional control algorithms, such as the linear quadratic regulator and the linear-quadratic-Gaussian control. Therefore the command of LQG optimal controller is merely a proportional feedback of the estimated state of the structure at the moment of exertion. This state approximation is performed by optimal state estimator or Kalman filter. In the proposed control algorithm, new variables are considered in the state space equation of the motion and also in both of Kalman Filter estimator and the optimal regulator. The new variables include control force and earthquake force, acceleration of the ground motion, which is non-measurable during the exertion of control force. This technique makes the controller be a combination of the control force in the last step and proportional feedback of the states in two last steps. According to the proposed control algorithm, two ways are selected. In the first, command control is the sum of the control force and ratios of the estimated state and measurement output of sensors, which are obtained and used in previous time step. The estimated state of system, used in the first command control, is calculated by the conventional and known Kalman Filter. In the second strategy of control, the Kalman Filter estimator is firstly modified based on new state space equations, and then the estimated state of structure is used for calculation of command control. Numerical simulation of a seven-storey structure with active control system under two far-fault earthquakes, including Northridge and Kobe, and two near-fault earthquakes, including El Centro and Hachinohe, are performed to show effectiveness of two proposed controls on mitigation of structural responses and compare to those of a uncontrolled structure and a structure controlled with conventional control. Also by sensitivity analysis, performance measures of controllers are investigated against changes of some controlling and perturbation parameters of systems or uncertainties. The performance measures include percentage reduction of the roof displacement of the controlled structure relative to that of the uncontrolled one, the root mean squares of normalized displacements, accelerations and control forces produced in controlled structure and total control energies exerted by all stories' active devices under various controllers. The studied uncertainties are covariance of measurement noises and ambient loads. Increasing covariance of ambient loads as well as decreasing that of the measurement noise results in roof displacement reduction together with need to increase control energy. The analysis results demonstrate that performance of the proposed controllers, specially the second one, are better and also stable and robust under intensity and variations of uncertainties. So that the greatest reduction in maximum displacement (even up to 80 percent) compared to uncontrolled displacement of structure and meanwhile, very low energy consumption (about 10 percent of the maximum energy used by other controllers) are attained by the second proposed control strategy.

Keywords: LQG optimal control, Kalman filter, Active structural control, Structural dynamics, Earthquake.