



کد مقاله: ۲-۱۳۲

## کنترل فعال سازه های در معرض زلزله با استفاده از کنترل کننده مقاوم PID

صادق اعتدالی<sup>۱</sup>، ایمان منصوری<sup>۲</sup>

۱- عضو هیأت علمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، [etedali@birjandut.ac.ir](mailto:etedali@birjandut.ac.ir)

۲- عضو هیأت علمی، دانشگاه صنعتی بیرجند

### چکیده

پیاده‌سازی موفقیت‌آمیز تکنولوژی هوشمندسازی سازه‌ها در برابر زلزله، مستلزم وجود یک الگوریتم کنترلی مناسب برای محاسبه نیروی کنترلی مورد تقاضای محرک‌ها است. یکی از مسائل مهم در پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی فعال، ارزیابی مقاومت کنترل کننده در برابر عدم قطعیت‌های مدل و مشکلات ناشی از سرریزشدگی است. در این مقاله یک کنترل کننده مقاوم PID برای کنترل لرزه ای یک سازه مجهز به کابل‌های فعال ارائه شده است. عملکرد و مقاومت کنترل کننده پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده LQG ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که کنترل کننده پیشنهادی، بر خلاف کنترل کننده LQG، در حضور عدم قطعیت‌های ناشی از خطاهای مدل‌سازی و در زلزله‌های با شدت و محتوای فرکانسی مختلف، عملکرد مطلوب خود را حفظ می‌نماید.

**کلمات کلیدی:** سازه‌های هوشمند، کنترل سازه‌ها، کنترل کننده PID، خطاهای مدل‌سازی، کنترل کننده مقاوم

### ۱- مقدمه

عنصر کلیدی در پیاده‌سازی موفقیت‌آمیز تکنولوژی سازه هوشمند، وجود یک الگوریتم کنترل کننده موثر برای محاسبه نیروی های کنترلی مورد تقاضای محرک‌ها است. سازه‌های عمرانی بزرگ و پیچیده هستند و نیروهای دینامیکی خارجی وارد بر آن‌ها ماهیتی ناشناخته دارند. یک الگوریتم کنترلی موثر می‌بایستی مقاوم بوده و در شرایط مختلفی از اعمال نیروهای دینامیکی، عملکرد مناسبی در کاهش پاسخ ارتعاشی سیستم سازه‌ای داشته باشد. از عمده‌ترین الگوریتم‌های موجود در کنترل سازه، الگوریتم تنظیم کننده بهینه خطی درجه دو موسوم به کنترل کننده LQR، کنترل کننده گوسی درجه دوم خطی موسوم به کنترل کننده LQG، روش کنترل بهینه آنی، روش تخصیص قطب‌ها و کنترل کننده‌های مبتنی بر هوش مصنوعی شامل الگوریتم‌های کنترلی مبتنی بر روش‌های بهینه‌سازی عددی، کنترل کننده‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی و کنترل کننده‌های فازی می‌باشند. هر یک از این الگوریتم‌ها قابلیت‌های مشخصی جهت کنترل سازه دارند.

علیزغم پیشرفت‌های زیاد صورت گرفته در کنترل کننده‌های صنعتی، کنترل کننده کلاسیک تناسبی-انتگرالی-مشتقی موسوم به کنترل کننده PID همچنان به‌طور گسترده‌ای در سیستم‌های کنترلی صنعتی به کار می‌روند. استفاده از کنترل کننده PID برای کنترل ارتعاشات سازه‌هایی نظیر تیرها و صفحات به کمک مواد هوشمند، مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است. با این وجود در تاریخچه کاربرد آن در حوزه کنترل

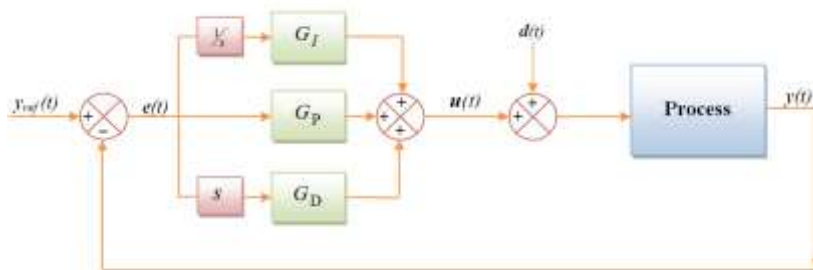
ارتعاشات لرزه ای ساختمان ها، تحقیقات تئوری و تجربی اندکی به چشم می خورد. در این میان مطالعات انجام شده در زمینه کنترل سازه های ساختمانی با کنترل کننده PID محدود به مطالعات زیر می باشند:

باوفا طوسی و همکاران [۱]، یک کنترل کننده PID را برای کنترل لرزه ای یک سازه ۳ طبقه در معرض زلزله ال سنترو، مجهز به یک محرک هیدرولیکی در طبقه اول، طراحی کردند. گوسلو [۲]، برای کنترل فعال لرزه ای یک سازه ۵ طبقه جداشده در پایه، یک کنترل کننده فازی و یک کنترل کننده PD طراحی کرد. وی برای طراحی پارامترهای کنترل کننده از قواعد تنظیم زیگلر-نیکولز استفاده نمود. گوسلو [۳]، برای کنترل لرزه ای یک سازه ۴ طبقه مجهز به یک محرک در طبقه دوم، یک کنترل کننده مود لغزشی و یک کنترل کننده PID طراحی کرد. وی برای طراحی پارامترهای کنترل کننده PID از قواعد تنظیم زیگلر-نیکولز استفاده نمود. گوسلو و یازیکی [۴]، یک کنترل کننده فازی و یک کنترل کننده PID را برای کنترل فعال لرزه ای یک سازه ۱۵ طبقه جداشده در پایه و با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه طراحی نمودند. آن ها برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID از قواعد تنظیم زیگلر-نیکولز استفاده نمودند. آن ها به مانند مطالعات قبلی ورودی های کنترل کننده فازی را جابجایی و سرعت طبقه تحت کنترل و خروجی آن را نیروی کنترلی محرک در نظر گرفتند و برای تامین یک عملکرد مناسب از کنترل کننده، از روش مبتنی بر سعی و خطا با توابع عضویت مثلثی بهره بردند. گوسلو و یازیکی [۵]، یک کنترل کننده فازی و یک کنترل کننده PD برای سازه های چند درجه آزادی پیشنهاد دادند. آن ها مطالعات عددی را بر روی یک سازه ۱۵ طبقه مجهز به یک سیستم میراگر جرمی تنظیم شده در بام انجام دادند. گوسلو و یازیکی [۶]، یک کنترل کننده فازی-PID را برای کنترل لرزه ای یک سازه ۱۵ طبقه مجهز به سیستم میراگر جرمی تنظیم شده فعال، ATMD، طراحی کردند. هدف از این طراحی بالابردن مقاومت سیستم کنترلی در مواجهه با عدم قطعیت های مدل عنوان شده است. آنها برای بررسی میزان حساسیت سیستم کنترلی به عدم قطعیت های مدل، سختی سیستم را به میزان  $\pm 25\%$  تغییر دادند و نتایج شبیه سازی را بر روی سیستم های جدید بررسی نمودند. نتایج مقاوم بودن سیستم کنترلی در مواجهه با عدم قطعیت ها را نشان می دهند. آگویرر و همکاران [۷]، یک راهبرد کنترلی نیمه فعال را بر مبنای کنترل کننده ساده PI ارائه دادند. بهره های تناسبی و انتگرالی این کنترل کننده طوری طراحی می شوند که ضمن تضمین پایداری سیستم بر مبنای معیار پایداری روث-هورویتز، پاسخ سیستم حلقه بسته را کمینه نماید. آن ها روش کنترلی پیشنهاد شده را بر روی یک سازه محک سه طبقه، مجهز به یک میراگر MR در طبقه اول، پیاده سازی کردند. روش ارائه شده در مقایسه با سایر روش های کنترل مقاوم، ساده و به دور از هرگونه پیچیدگی است. مطالعات آن ها برای سازه مورد مطالعه تحت تحریک خارجی زلزله های ال سنترو، لوماپریتا و نورتریج در دو حالت کنترل نشده و کنترل شده، موثر بودن راهبرد کنترلی را در کاهش پاسخ های سازه ای در هنگام زلزله نشان می دهند. اعتدالی و همکاران [۸]، یک کنترل کننده PD، PID و PID مبتنی بر قواعد اسکوگستاد را برای کنترل نیمه فعال یک سازه جداشده در پایه مجهز به میراگرهای اصطکاکی پیزوالکتریک به کار بردند و نشان دادند که کنترل کننده های به کار گرفته شده قادر به کاهش همزمان جابجایی طبقه جداشده و شتاب طبقات سازه در زلزله های دور و نزدیک گسل هستند. در این مقاله یک کنترل کننده مقاوم PID برای کنترل لرزه ای یک سازه مجهز به سیستم های کنترل فعال ارائه شده و عملکرد و مقاوم بودن آن در مقایسه با کنترل کننده LQG ارزیابی شده است.

## ۲- کنترل کننده مقاوم PID

الگوریتم های متعارف کنترل مدرن در کنترل لرزه ای سازه ها، به مدل اسمی سازه وابسته اند و لذا ممکن است در حضور عدم قطعیت های مدل، اهداف کنترلی از پیش تعیین شده را برآورده نکنند و در روش های کنترل فعال گاهها سیستم را به سمت ناپایداری سوق دهند. ضمن

اینکه در این روش ها شفافیت و حس مهندسی به خوبی مشهود نمی باشد. سادگی ساختار، قدرت و انعطاف پذیری کنترل کننده PID در صنعت، لزوم به کارگیری این کنترل کننده را برای کنترل لرزه ای سازه ها آشکار می کند. بر این اساس، وجود یک فرآیند سیستماتیک برای تنظیم پارامترهای این کنترل کننده که به مسائلی از قبیل عدم قطعیت های مدل و ماهیت تصادفی اغتشاشات بار توجه داشته باشد، ضروری است. نمودار بلوکی کنترل کننده PID در یک فرآیند یک ورودی- یک خروجی در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱: نمودار بلوکی کنترل کننده PID در یک فرآیند یک ورودی- یک خروجی

اگر  $k_{PID}(s)$  تابع تبدیل کنترل کننده PID باشد، در این صورت کنترل کننده PID از طریق معادله (۱) بدست می آید [۹].

$$K_{PID}(s) = k_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (1)$$

متغیر کنترلی PID را می توان در حوزه زمان به صورت معادله (۲) بیان نمود.

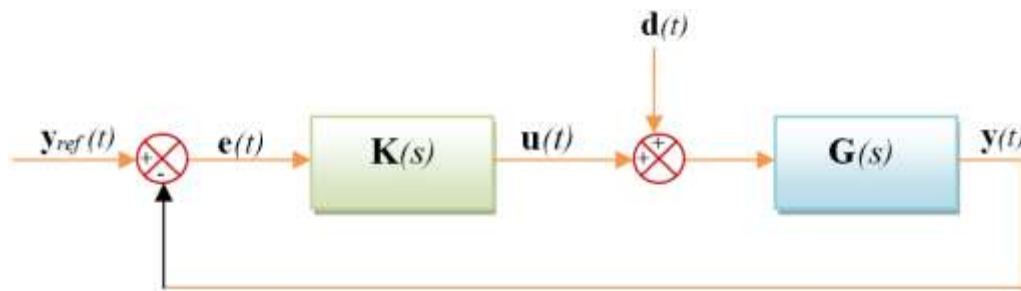
$$u_{PID}(t) = k_c \left[ e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2)$$

که  $k_c$  بهره ی تناسبی،  $\tau_i$  زمان انتگرالی و  $\tau_d$  زمان مشتقی است. با تعریف  $G_P = K_C$ ،  $G_I = K_C / \tau_i$  و  $G_D = K_C / \tau_d$ ، معادله (۲) را می توان به صورت معادله (۳) بازنویسی کرد.

$$u_{PID}(t) = G_P e(t) + G_I \int_0^t e(t) dt + G_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

بنابراین متغیر کنترلی  $u_{PID}(t)$  از جمع سه جزء مختلف بدست می آید: جزء P (کنترل کننده تناسبی) که متناسب با خطا است، جزء I (کنترل کننده انتگرالی) که متناسب با انتگرال خطا است و جزء D (کنترل مشتقی) که متناسب با مشتق خطا است. پارامترهای کنترل کننده که طراح می بایستی تعیین نماید، شامل ثابت تناسبی ( $G_P$ )، انتگرالی ( $G_I$ ) و مشتقی ( $G_D$ ) است. همچنین پارامتر  $t$ ، زمان فرآیند کنترلی را نشان می دهد.

شکل ۲ نمودار بلوکی یک فرآیند کنترلی چند متغیره را نشان می دهد. اگر فرآیند کنترلی مورد نظر دارای  $m$  ورودی و  $n$  خروجی باشد، در این صورت بردارهای  $\mathbf{y}(t)$ ،  $\mathbf{y}_{ref}(t)$  و بردارهای  $\mathbf{e}(t)$  مولفه ای خواهند بود که به ترتیب نمایانگر بردارهای خروجی سیستم، ورودی مرجع و خطا خواهند بود.  $\mathbf{d}(t)$  و  $\mathbf{u}(t)$  نیز بردارهای  $m$  مولفه ای است که اغتشاش بار و ورودی سیستم را نشان می دهد.



شکل ۲: نمودار بلوکی یک فرآیند کنترلی چند متغیره

در صورتی که فرآیند کنترلی یک سیستم سازه ای  $n$  درجه آزادی باشد، در این صورت  $\mathbf{y}(t) = [y_1(t), \dots, y_n(t)]^T$  بردار خروجی فرآیند (بردار سرعت، جابجایی یا شتاب سازه)،  $\mathbf{d}(t) = [d_1(t), \dots, d_n(t)]^T$  بردار اغتشاش بار ورودی به سیستم (بردار نیروی دینامیکی زلزله) و  $\mathbf{y}_{ref}(t) = [y_{1ref}(t), \dots, y_{nref}(t)]^T$  مقدار مطلوب برای خروجی سیستم (بردار مطلوب جابجائی، شتاب یا سیستم مطلوب سازه) و بردار خطا می باشد که اختلاف میان مقدار مطلوب خروجی سیستم با مقدار خروجی فرآیند می باشد. به عبارت دیگر  $\mathbf{e}(t) = \mathbf{y}(t) - \mathbf{y}_{ref}(t)$ . همچنین  $\mathbf{u}(t) = [u_1(t), \dots, u_n(t)]^T$  بردار ورودی فرآیند یا بردار نیروهای کنترلی می باشد با فرض اینکه تعداد ورودی های سیستم (تعداد طبقات کنترل شده)  $n_c$  باشد، تعداد  $n - n_c$  عضو از این بردار مقدار صفر را خواهند داشت.

پارامترهای کنترل کننده را معمولاً هماهنگ با مشخصات فرآیند انتخاب می کنند. از آن جایی که دینامیک فرآیند تغییر می کند، باید پارامترهای کنترل کننده را به گونه ای انتخاب کنیم که سیستم حلقه بسته، نسبت به تغییرات دینامیک فرآیند خیلی حساس نباشد. برای پرداختن به مسئله عدم قطعیت در مدل، رفتار دینامیکی یک سیستم کنترلی علاوه بر مدل اسمی سیستم، می بایستی برای خانواده ای از مدل اسمی نیز بررسی شود. یک سیستم کنترل مقاوم است، اگر به عدم قطعیت های مدل حساس نباشد. پایداری مقاوم نیز به این معنا است که سیستم برای خانواده ای از مدل اسمی پایدار بماند [۱۰]. معیار بیشینه حساسیت، یکی از معیارهای مهم برای تعیین حساسیت سیستم کنترلی به عدم قطعیت های مدل و بررسی حاشیه پایداری سیستم است که با معادله (۴) بیان می شود.

$$M_s = \max_{0 \leq \omega \leq \infty} |S(j\omega)| = \max_{0 \leq \omega \leq \infty} \left| \frac{1}{1 + G(j\omega)K(j\omega)} \right| \quad (4)$$

این معیار را می توان بر اساس منحنی نایکویست تابع انتقال  $G(S)K(S)$  بیان نمود. طبق تعریف این معیار، عکس کوتاهترین فاصله بین منحنی نایکویست تا نقطه بحرانی  $-1$  می باشد. مقادیر منطقی این مقدار در محدوده  $1/2$  تا  $2$  قرار می گیرد. تفسیر هندسی این معیار این است که منحنی نایکویست تابع انتقال حلقه، همواره خارج از دایره ای قرار می گیرد که به مرکز نقطه بحرانی  $-1$  و شعاع  $1/M_s$  رسم می شود. با انتخاب مقادیر

کم  $M_s$  سیستم کنترلی مقاوم تر می شود و با انتخاب مقادیر بزرگ  $M_s$  سرعت پاسخ سیستم کنترلی افزایش می یابد. ایجاد تعادل میان این دو هدف را می توان با تنظیم این مقدار برابر ۱/۶ فراهم نمود [۹].

مسئله تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID در واقع یک مسئله بهینه سازی است. یکی از راههای تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID، بهره گیری از الگوریتم ژنتیک است. در این حالت می بایستی مسئله کنترل را به یک مسئله بهینه سازی تبدیل و با انتخاب یک شاخص عملکرد مناسب، با توجه به آنچه در بخش قبل تشریح شد، تنظیمات کنترل کننده را انجام داد. برای دستیابی به پارامترهایی از کنترل کننده PID که قادر باشند در زلزله های مختلف با شدت و محتوای فرکانسی متفاوت، عملکرد مناسبی داشته باشد، می توان از شتاب مصنوعی تولید شده با توابع تبدیل پیشنهاد شده برای مدلسازی زلزله ورودی به سیستم استفاده کرد. در این مقاله برای مدل سازی زلزله های احتمالی از یک اغتشاش سفید گوسی با باند محدود با تابع تبدیل نشان داده شده در معادله (۵) که توسط ناگارجیا و ناراسیمهان [۱۱] پیشنهاد شده، استفاده شده است.

$$F(s) = \frac{4\xi_g \omega_g S}{S^2 + 2\xi_g \omega_g S + \omega_g^2} \quad (5)$$

$\omega_g$  و  $\xi_g$  به ترتیب میرایی و فرکانس زمین است که برای خاکهای مختلف دارای مقادیر متفاوتی است. اغتشاش سفید خالص تولید شده، توسط این تابع تبدیل به یک زلزله مصنوعی برای تحریک پایه سازه تبدیل می شود که می توان از آن برای شبیه سازی زلزله های احتمالی استفاده نمود. در مطالعات عددی انجام شده، از این تابع تبدیل برای مدل سازی اغتشاش ورودی به سیستم استفاده شده است. در این مطالعات مقادیر  $\xi_g = 0.3$ ،  $\omega_g = 2\pi \text{ rad/s}$  که مربوط به خاک های معمولی می باشد در نظر گرفته شده است. زلزله مصنوعی تولید شده از این تابع، نماینده آماری خوبی از زلزله ها با شدت و محتوای فرکانسی مختلف می باشد.

همچنین از معیار بیشینه حساسیت سیستم کنترلی به خطاهای مدلسازی، برای دستیابی به یک کنترل کننده مقاوم در برابر عدم قطعیت های مدل می توان استفاده نمود. محدوده مجاز این معیار می تواند به عنوان یک قید، به تابع شاخص عملکرد اضافه شود. در چنین حالتی مسئله بهینه سازی را می توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\begin{cases} \text{Min} & I = \sum_{k=1}^m w_k I_k \\ \text{Subjected to} & M_s - 1.6 \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

که  $w_k$  ( $k=1, \dots, m$ )، ضرایب وزنی و  $I_k$  ( $k=1, \dots, m$ ) می توانند مقادیر نرمالیزه شده ای از پاسخ سیستم کنترل شده به کنترل نشده باشند. انتخاب هر کدام از مقادیر نرمالیزه شده برای شاخص عملکرد بر مبنای اهداف کنترلی طرح و بر مبنای مسئله تعریف شده توسط طراح کنترل کننده می بایستی انتخاب شود. بسته به اهمیت هر یک از  $I_k$  ها، ضرایب آن ها نیز تعیین می شود. مسئله بالا با اعمال محدودیت نامساوی (به صورت تابع جریمه در تابع هدف) به یک مسئله بهینه سازی بدون محدودیت به صورت زیر تبدیل می شود:

$$\text{Min } I = \sum_{K=1}^m w_k I_k + w_{ms} M_s \quad (7)$$

ضریب مربوط به تابع جریمه،  $w_{ms}$ ، برای دستیابی به یک کنترل کننده مقاوم باید به صورت مناسبی به وسیله ی طراح تعیین شود.

### ۳- مطالعه عددی

کابل های فعال، یکی از سیستم های کنترل فعال در سازه های هوشمند محسوب می شوند. اضافه کردن این سیستم بر روی سازه های موجود نسبتاً کم هزینه بوده و مستلزم انجام تغییرات زیادی در سازه نمی باشد و برای هوشمند کردن سازه، تنها به به نصب یک سیستم کنترل کننده و جک های هیدرلیکی نیاز است.

یک سازه ده طبقه مجهز به کابل های فعال برای انجام مطالعات عددی انتخاب شده است. این سازه توسط پارک و همکاران [۱۲] معرفی شده است. جرم طبقه اول سازه برابر  $685/3$  تن، طبقات دوم تا هشتم آن برابر  $579/4$  تن و طبقات نهم و دهم آن برابر  $566/7$  تن است. همچنین سختی طبقه اول تا هشتم سازه برابر  $256000$  کیلونیوتن بر متر و طبقات نهم و دهم آن برابر  $174000$  کیلونیوتن بر متر در نظر گرفته شده است. ارتفاع طبقات سازه  $3$  متر و درصد میرایی برای تمام مودها برابر  $2$  درصد فرض شده است. فرکانس مود اول و آخر سازه به ترتیب برابر  $0/5$  و  $6/58$  هرتز محاسبه شده است. برای کنترل سازه دو کابل فعال در طبقات سوم و پنجم قرار گرفته است. انحراف در سختی طبقات سازه به عنوان خطای مدل سازی در نظر گرفته شده است. دو زلزله دور از گسل ال سنترو ( $1940$ ) و هاچینو ( $1968$ ) و همچنین دو زلزله نزدیک گسل نورث ریج ( $1994$ ) و کوبه ( $1995$ ) به ترتیب با مقادیر بیشینه شتاب برابر  $0.8178g$ ,  $0.8267g$ ,  $0.2250g$ ,  $0.3417g$  به عنوان اغتشاشات ورودی به سازه در نظر گرفته شده اند.

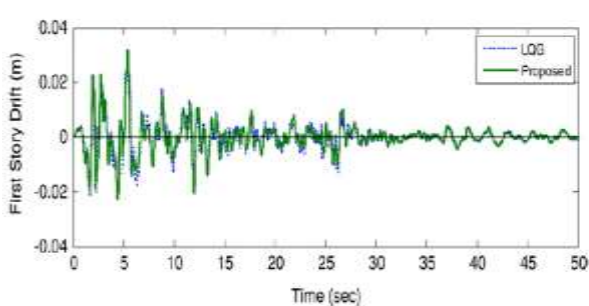
روش های متداول کنترل در تئوری کنترل مدرن نظیر LQR و LQG، به دلیل نادیده گرفتن مسئله خطاهای مدلسازی، ممکن است که به عدم قطعیت های موجود در پارامترهای دینامیکی سازه حساس می باشد. همچنین این کنترل کننده ها ممکن است موجب ناپایداری سیستم کنترلی شوند. این مسئله به خصوص در سیستم های کنترل فعال که پتانسیل ناپایداری در آن ها وجود دارد، اهمیت پیدا می کند. پارک و همکاران با ارائه یک کنترل کننده مقاوم و مقایسه آن برای با کنترل کننده LQG طراحی شده برای سازه مذکور نتیجه گرفتند که عملکرد لرزه ای دو کنترل کننده برای مدل اسمی سازه نزدیک به هم می باشند و اختلاف چندانی با هم ندارند، اما برای مدل های انحرافی سیستم مشاهده کردند که کنترل کننده LQG عملکرد مناسبی نداشته و سیستم را به سمت ناپایداری سوق می دهد. شکل ۳ این نتایج را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود جایجایی نسبی طبقه اول در مدل با  $3\%$  تغییر سختی سازه بعد از حدود  $15$  ثانیه از زلزله ال سنترو، به دلیل عملکرد ضعیف کنترل کننده در مواجهه با عدم قطعیت های مدل، افزایش چشمگیری پیدا کرده است. همچنین نیروی کنترل در ثانیه های آخر زلزله که شتاب زلزله افت محسوسی دارد، افزایش پیدا کرده است. با توجه مطالب فوق برای بررسی عملکرد و به خصوص مقاومت کنترل کننده پیشنهادی، این سازه گزینه مناسبی است. برای این منظور این سازه شبیه سازی و کنترل کننده مقاوم PID بر روی آن پیاده سازی شده است.

در این مطالعه شاخص عملکرد کنترل کننده به صورت زیر تعریف شده است:

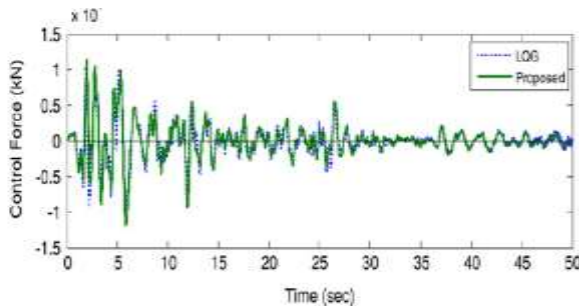
$$\begin{cases} \text{Min } w_1 I_{1i} + w_2 I_{2i} + w_3 I_{3i} + w_4 I_{4i} \\ \text{s.t } M_{si} - 1.6 \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

که  $w_k$  ( $k=1, \dots, 4$ )، ضرایب وزنی و  $I_k$  ( $k=1, \dots, 3$ ) به ترتیب مقادیر نرمالیزه شده بیشینه جابجایی طبقات، بیشینه شتاب طبقات، بیشینه دررفت طبقات سازه کنترل شده به مقادیر متناظرشان از سازه کنترل نشده سازه می باشند. همچنین  $I_4$  معرف بیشینه نیروی کنترل مودال نرمالیزه شده به بیشینه برش پایه سازه کنترل شده است. مسئله بهینه سازی فوق را می توان با ساختن یک تابع به صورت زیر به یک مسئله کمینه سازی نامقید تبدیل کرد.

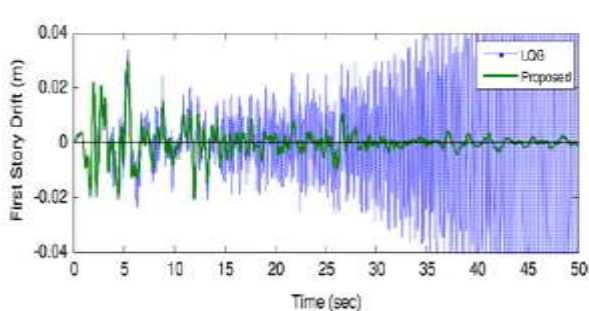
$$J = w_1 I_1 + w_2 I_2 + w_3 I_3 + w_4 I_4 + w_5 M_s \quad (9)$$



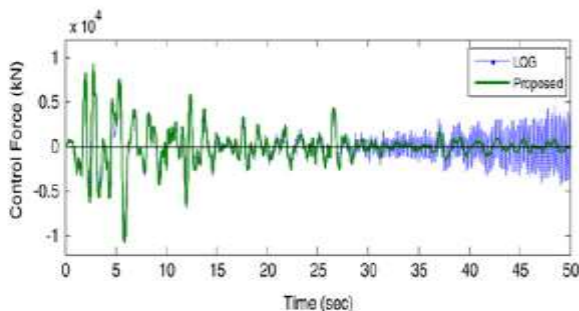
جابجایی طبقه اول برای مدل اسمی



نیروی کنترلی مورد تقاضا برای مدل اسمی



جابجایی طبقه اول برای ۲ درصد انحراف در سختی سازه



نیروی کنترلی مورد تقاضا برای ۲ درصد انحراف در سختی سازه

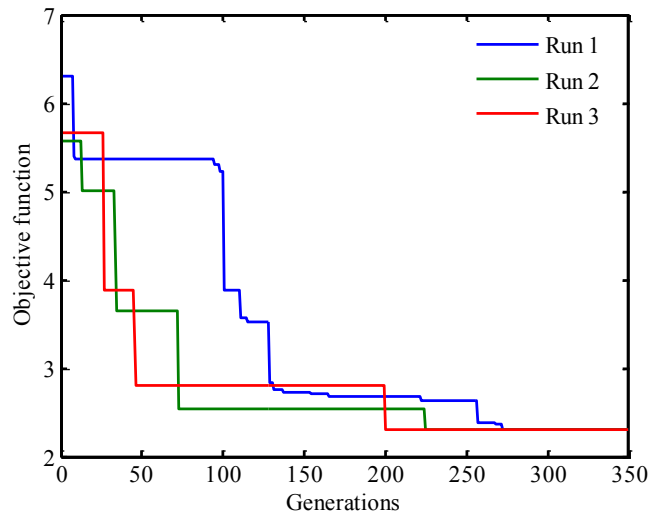
شکل ۳: مقایسه پاسخ ها و نیروهای کنترلی میان کنترل کننده LQG و کنترل کننده پیشنهادی پارک و همکاران [۱۲]

در این مطالعه ضرایب وزنی  $w_1 = w_2 = 1$  و  $w_3 = 0.5$  و  $w_4 = 5$  انتخاب شده اند. اگر قید مطرح شده در معادله (۸) برقرار باشد،  $w_5 = 0$  و در غیر این صورت با مقدار  $w_5 = 10$  جریمه می شود. بدین ترتیب ضمن کمینه کردن پاسخ های مهم سازه ای نظیر جابجایی، شتاب و دررفت طبقات، به مسئله محدودیت نیروهای کنترلی و عدم تخمین دقیق پارامترهای دینامیک توجه شده است. شکل ۴ همگرایی الگوریتم ژنتیک برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID را به تصویر کشیده است.

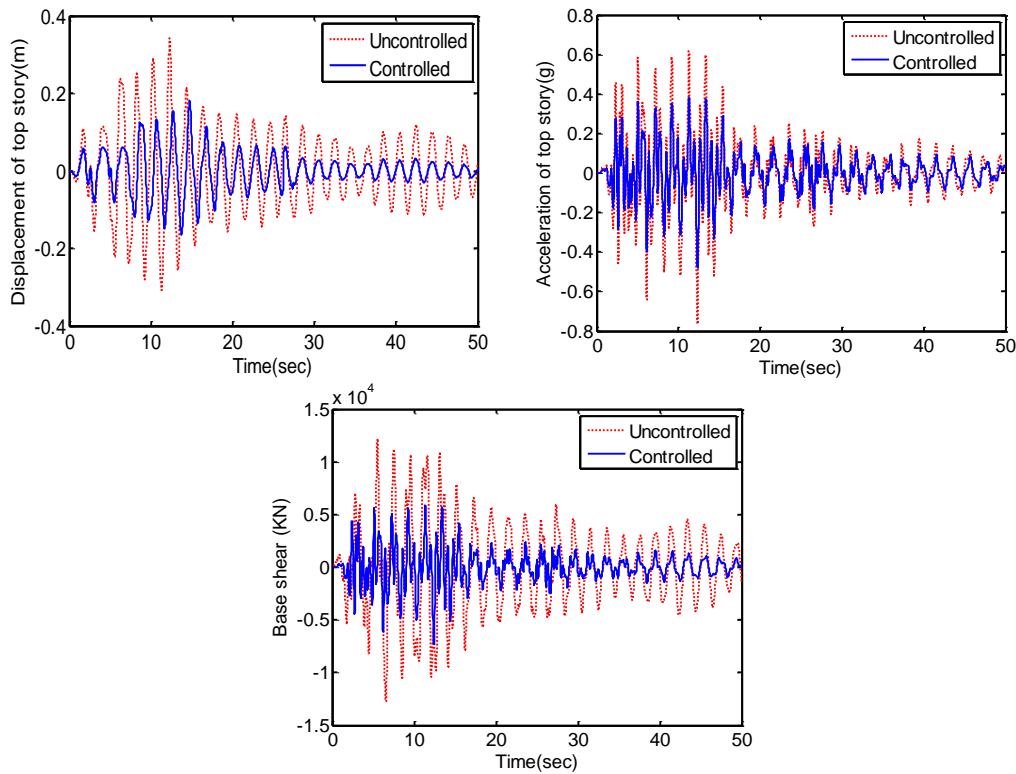
#### ۴- بحث و نتیجه گیری

شکل ۵ تاریخچه زمانی جابجایی، شتاب بام و برش پایه مدل اسمی سازه کنترل شده با کنترل کننده غیرمتمرکز مقاوم PID را در مقایسه با حالت کنترل نشده برای زلزله ال سترو نشان می دهند. همان طور که مشاهده می شود بیشینه جابجایی بام، شتاب و برش پایه سازه کنترل نشده به

ترتیب در حدود 34.13 cm،  $7.49 \text{ m/s}^2$  و 12750.12 KN است. مقادیر متناظر برای سازه کنترل شده به ترتیب در حدود 18.14 cm،  $4.71 \text{ m/s}^2$  و 7310.13 KN حاصل شده اند که کاهش حدود ۴۷، ۳۷ و ۴۳ درصدی را نشان می دهند.



شکل ۴: همگرایی الگوریتم ژنتیک برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID در سازه مجهز به کابل های فعال



شکل ۵: تاریخچه زمانی جابجایی، شتاب بام و برش پایه سازه کنترل نشده و کنترل شده در زلزله ال سترو



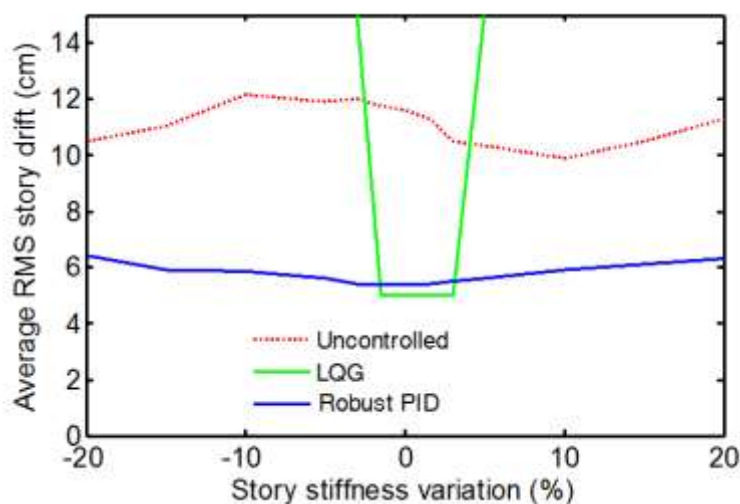
۶ شاخص عملکرد برای ارزیابی عملکرد سازه تعریف شده است. شاخص های عملکرد  $J_1$  تا  $J_3$  به ترتیب نشان دهنده مقادیر نرمالیزه شده بیشینه جابجایی بام، بیشینه شتاب بام، بیشینه دررفت طبقات سازه کنترل به مقادیر متناظر آن ها در سازه کنترل نشده است. شاخص های  $J_4$  تا  $J_6$  به ترتیب مقادیر نرمالیزه شده جذر میانگین مربعات جابجائی بام، جذر میانگین مربعات بام سازه کنترل شده و بیشینه میانگین مربعات دررفت طبقات سازه کنترل شده به مقادیر متناظرشان در سازه کنترل نشده را نشان می دهند.

جدول ۱: شاخص های عملکرد کنترل کننده در سازه ۱۰ طبقه

	مدل	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$
ال سترو	مدل اسمی	0.53	0.63	0.64	0.62	0.76	0.57
	مدل ۱	0.55	0.67	0.67	0.60	0.75	0.57
	مدل ۲	0.52	0.70	0.75	0.50	0.69	0.57
کوبه	مدل اسمی	0.56	0.63	0.54	0.58	0.75	0.68
	مدل ۱	0.54	0.62	0.55	0.64	0.72	0.56
	مدل ۲	0.69	0.61	0.70	0.62	0.77	0.57
هاچینو	مدل اسمی	0.57	0.55	0.60	0.57	0.80	0.56
	مدل ۱	0.61	0.72	0.60	0.60	0.80	0.67
	مدل ۲	0.64	0.65	0.75	0.57	0.90	1.00
نورث ریج	مدل اسمی	0.75	0.69	0.53	0.57	0.74	0.47
	مدل ۱	0.75	0.61	0.47	0.68	0.86	0.48
	مدل ۲	0.70	0.72	0.62	0.56	0.56	0.55

مقادیر شاخص عملکرد برای مدل اسمی سازه و همچنین مدل های ۱ و ۲ که به ترتیب با تغییر سختی سیستم به اندازه ۲۰٪- و ۲۰٪+ ایجاد شده اند، در جدول زیر درج شده اند. با ملاحظه شاخص های عملکرد مربوط به پاسخ های سازه ای مهم شامل بیشینه جابجایی بام، بیشینه شتاب بام و بیشینه جابجایی نسبی طبقات در مدل های ۱ و ۲ می توان دریافت که کنترل کننده پیشنهادی در حضور عدم قطعیت های ناشی از خطاهای مدل سازی و در زلزله های با شدت و محتوای فرکانسی مختلف، عملکرد مطلوب خود را حفظ نموده است. این نتایج برای جذر میانگین پاسخ ها نیز برقرار است.

شکل ۶ مقادیر میانگین جذر میانگین مربعات دررفت طبقات سازه در برابر تغییرات سختی طبقات سازه نشان می دهد. کنترل کننده LQG در مدل اسمی سازه عملکرد نسبتاً بهتری در کاهش دررفت طبقاتی داشته است این کنترل کننده در محدوده تغییراتی ۲/۵- تا ۳ درصد پایدار مانده، اما با تغییرات بیشتر سختی، ناپایدار شده و پاسخ سیستم سازه ای را به شدت افزایش می دهد، این در حالی است که کنترل کننده پیشنهادی با تغییرات سختی سازه به عدم قطعیت های سازه ای حساس نبوده و ضمن حفظ پایداری، همچنان قادر به تامین اهداف کنترلی می باشد.



شکل ۶: مقایسه مقاومت کنترل کننده های LQG و کنترل کننده مقاوم PID برای سازه مورد مطالعه

## ۵- نتیجه گیری نهایی

در این مقاله یک کنترل کننده مقاوم PID برای کنترل لرزه ای یک سازه مجهز به کابل های فعال ارائه شد. عملکرد و مقاومت کنترل کننده پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده LQG ارزیابی شد. نتایج شبیه سازی ها بر روی این سازه نشان می دهند که کنترل کننده پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده LQG، عملکرد مناسب تری را در کاهش پاسخ های لرزه ای فراهم می کند. علاوه بر آن، این کنترل کننده به عدم قطعیت های مدل حساس نبوده و در حضور آن ها، عملکرد مطلوب کنترلی از پیش تعیین شده اش را حفظ می نماید. این کنترل کننده قادر به حفظ یک حاشیه ایمن برای حفظ پایداری سیستم سازه ای بوده و در سیستم های کنترل فعال، پایداری سازه را تضمین می نماید، این در حالی است که پتانسیل ناپایداری سیستم های سازه ای مجهز به ابزارهای فعال با به کارگیری کنترل کننده های متداول در تئوری کنترل مدرن نظیر LQR و LQG وجود دارد.

## مراجع

- [1]. Bavafa-Toosi, Y., Khaki-Sedigh, A., Ghasemzadeh, S., Authoritative Seismic Excited Structured Control via Classical PID, *Electrical and Computer Engineering Series, World Scientific and Engineering Press*, pp. 370-374, 2000.
- [2]. Guclu, R., Fuzzy-Logic Control of Vibrations of Analytical Multi-Degree-Of-Freedom Structural Systems, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 27, pp. 157-167, 2003.
- [3]. Guclu, R., Sliding Mode and PID Control of a Structural System Against Earthquake, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 44, No. 1-2, pp. 210-217, 2006.
- [4]. Guclu, R., Yazici, H., Fuzzy-Logic Control of a Non-Linear Structural System Against Earthquake Induced Vibration, *Journal Vibration Control*, Vol. 13, No. 11, pp. 1535-1551, 2007.
- [5]. Guclu, R., Yazici, H., Vibration Control of a Structure with ATMD against Earthquake using Fuzzy Logic Controllers, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 318, No. 1-2, pp. 36-49, 2008.
- [6]. Guclu, R., Yazici, H., Seismic-Vibration Mitigation of a Nonlinear Structural System with an ATMD through a Fuzzy PID Controller, *Nonlinear Dynamic*, Vol. 58, No. 3, pp. 553-564, 2009.
- [7]. Aguirre, N., Ikhouane, F., Rodellar, J., Proportional-Plus-Integral Semi-Active Control using Magneto- Rheological Dampers, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, No. 10, pp. 2185-2200, 2011.

- [8]. Etedali, S., Sohrabi, M.R., Tavakoli, S., Optimal PD/PID control of smart base isolated buildings equipped with piezoelectric friction dampers, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 12, No. 1, pp. 39-54, 2013.
- [9]. Astrom, K.J., Haggglund, T., PID Controllers: Theory, Design and Tuning, *Instrument Society of America*, USA, 1995.
- [10]. Morari, M., Zafiriou, E., Robust process control, Prentice Hall, 1989.
- [11]. Nagarajaiah, S., Narasimhan, S., Smart Base-Isolated Benchmark Building- Part II: Phase I, Sample Controllers for Linear and Friction Isolation, *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 13, No. 2-3, pp. 589-604, 2006.
- [12]. Park, W., Park, K.S., Koh, H.M., Active control of large structures using a bilinear pole-shifting transform with  $H^\infty$  control method, *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 11, pp. 3336-3344, 2008.