

طراحی کنترلر فعال بهینه‌ی سازه‌ها با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی

جواد کاتبی^{۱*}، مونا شعاعی پرچین^۲

۱- استادیار دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه تبریز

*jkatebi@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۴/۱۱/۱۷]

تاریخ دریافت: [۹۴/۰۸/۱۸]

چکیده- از مهم‌ترین اهداف روش‌های کنترل بهینه‌ی سازه‌ها، دستیابی به حد مطلوب ارتعاشات با صرف انرژی کنترل‌ی کمینه است. در دهه‌های اخیر الگوریتم‌های کنترلی بسیاری پیشنهاد شده‌اند. بخش عمده‌ای از این روش‌ها از طریق بهینه‌کردن یک شاخص عملکرد مرتبه‌ی دوم اقدام به محاسبه‌ی نیروهای کنترل می‌نمایند. وجود فرضیه ساده‌کننده در فرمول‌بندی، محدودیت روش‌های بهینه‌سازی استفاده شده در بهینه‌سازی شاخص عملکرد و همچنین عدم ملاحظه‌ی اثر تحریک خارجی در محاسبه‌ی نیروهای کنترل، عملاً حصول جواب بهینه برای مسأله‌ی کنترل را دور از دسترس می‌سازد. در این پژوهش الگوریتم کنترلی ارائه می‌شود که با بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی فراکاوشی تکامل تفاضلی به عنوان یک روش نوین و توانمند که تاکنون بطور گسترده‌ای در کنترل سازه‌ها مورد استفاده قرار نگرفته، شاخص عملکرد سستی را بهینه می‌نماید. عناصر ماتریس بهره‌ی کنترل به وسیله‌ی روش تکامل تفاضلی به گونه‌ای در فضای مسأله جستجو می‌شوند تا شاخص عملکرد کمینه شود. روند تکراری الگوریتم پیشنهادی و عدم نیاز به حل معادله‌ی دیفرانسیل ریکاتی، ملاحظه‌ی اثر تحریکات زلزله را در محاسبه‌ی نیروهای کنترلی ممکن می‌سازد. نتایج حاصل از روش گفته شده در سازه‌های نمونه تحت تاثیر رکوردهای زلزله‌ی مختلف بیانگر کاهش پاسخ‌ها و نیروهای کنترلی مورد نیاز نسبت به تنظیم‌کننده‌ی خطی مرتبه‌ی دوم LQR است. همچنین، ماکزیمم نیروی کنترل و ماکزیمم پاسخ تغییرمکان و نه شاخص بنج‌مارک که در سازه‌های کنترل شده سنجیده می‌شود نیز محاسبه و با روش LQR مقایسه شده‌اند. کاهش این شاخص‌ها در حالت اعمال روش پیشنهادی نسبت به روش LQR نیز بیانگر کارایی روش ارائه شده در کنترل بهینه‌ی ارتعاشات سازه‌ها است.

واژگان کلیدی: کنترل فعال، فراکاوشی، تکامل تفاضلی، بهینه‌سازی.

۱- مقدمه

نیروی خارجی است که به دلیل قابلیت تغییر مشخصات سیستم در طول مدت بارگذاری، سیستمی هوشمند محسوب می‌شود و توانایی قابل توجهی در بهبود پاسخ سازه دارد. در حالت کلی مجموعه‌ای از محرک‌ها و حسگرها که تحت قانون کنترل مشخصی عمل می‌کنند، یک سیستم کنترل را تشکیل می‌دهند. این سیستم کنترلی با تکیه بر تئوری‌های مدون و براساس وضعیت پاسخ سازه اقدام به محاسبه و اعمال نیروهای کنترلی

ایده‌ی کنترل سازه‌ها راهکار نسبتاً جدید و کارآمدی است که از چند دهه‌ی گذشته تاکنون به عنوان روشی قابل اعتماد در کاهش ارتعاشات سازه‌ها استفاده شده است. هدف از کنترل، هدایت رفتار سازه تحت بارگذاری‌های مختلف به سمت یک رفتار مطلوب و قابل قبول است.

کنترل فعال تکنیک کنترل ارتعاشات سازه از طریق اعمال

در طول مدت وقوع زلزله کرده و پاسخ سازه را تا حد مطلوب کاهش می‌دهد.

محاسبه و پیش‌بینی جهت و اندازه‌ی نیروهای کنترلی بهینه در هر لحظه از اعمال بار دینامیکی یکی از مسائل مهم در زمینه‌ی کنترل فعال سازه‌ها است [1-3]. انتخاب الگوریتم مناسب محاسبه‌ی نیروهای کنترلی از مهم‌ترین عناصر سیستم کنترلی و یکی از اصلی‌ترین بخش‌های طراحی یک سیستم کنترل فعال است و مطالعات تئوریک و عملی و تلاش‌های پژوهشی فراوان در زمینه‌ی کنترل فعال سازه‌ها طی چند دهه‌ی گذشته منجر به ارائه‌ی الگوریتم‌های متعددی برای دستیابی به این هدف شده است. تنظیم‌کننده‌ی خطی مرتبه‌ی دو LQR¹، جایدهی قطب، تخصیص قطب، کنترل بهینه‌ی پیش‌بین، کنترل خطی گاوسی مرتبه‌ی دو LQG²، روش‌های H_2 و H_∞ کنترل به وسیله‌ی منطق فازی و کنترل با شبکه‌ی عصبی از جمله‌ی این الگوریتم‌ها است.

در این میان الگوریتم‌های کلاسیک کنترل بیشتر مبتنی بر تکرار بوده و دارای روند سعی و خطا است. هدف از روش‌های کنترل مدرن این است که طراحی از حالت تجربی درآمده تا بتوان کنترلر را برای کلاس وسیع‌تری از سیستم‌ها طراحی نمود. کنترل بهینه یکی از شاخه‌های کنترل مدرن است و مزیت ویژه‌ی آن نسبت به روش‌های کلاسیک این است که طراحی کنترلر را از حالت تجربی و سعی و خطا درآورده و یک مبنای ریاضی و الگوریتمیک قوی برای طراحی ایجاد می‌کند و در کنار آن مشخصات ویژه‌ای را برای سیستم به دنبال می‌آورد. در کنترل بهینه سیگنال کنترل به نحوی محاسبه می‌شود تا یک شاخص عملکرد کمینه شده و برای بدست آوردن نیروی کنترل، یک معادله‌ی دیفرانسیل از نوع ریکاتی باید حل شود. در این روش کنترل، محدودیت‌هایی روی سیگنال کنترل و یا محدودیت‌های حالات سیستم وجود دارد.

تنظیم‌کننده‌ی خطی مرتبه‌ی دو یا به اختصار LQR به عنوان روش پایه‌ی تئوری کنترل مدرن و متداول‌ترین تئوری کنترل بهینه‌ی خطی، به دلیل راحتی پیاده‌سازی در مسائل

مهندسی و اینکه مبنای سایر تئوری‌های کنترلی است، رایج‌ترین الگوریتم محاسبه‌ی نیروهای کنترلی محسوب می‌شود [4,5] و در کنترل فعال و نیمه‌فعال سازه‌ها کاربرد دارد. موسی نژاد و پورزینلی [6] برای کنترل ارتعاشات لرزه‌ای یک سازه‌ی ۱۲ طبقه از میراگر ویسکوز نیمه‌فعال و الگوریتم LQR استفاده کرده‌اند. Basu و Nagarajaiah [2] یک الگوریتم LQR تطبیقی متغیر با زمان ارائه دادند. یونس‌پور و غفارزاده در سال ۲۰۱۴ [7] الگوریتم کنترل فعالی براساس روش LQR و توابع BPF ارائه کردند. در بسیاری از مطالعات نیز از شبکه‌های عصبی و منطق فازی استفاده شده است [8-11].

روش‌های کلاسیک کنترل بهینه به دلیل ساده‌سازی‌ها در فرمول‌بندی آن‌ها، دستیابی به پاسخ‌های بهینه را تضمین نمی‌کنند و پاسخ‌های نزدیک به بهینه برای مسائل کنترل بدست می‌دهند. همچنین در این روش‌ها به دلیل ناشناخته بودن تحریکات زمین از در نظر گرفتن آثار آن در محاسبه‌ی نیروهای کنترلی چشم‌پوشی می‌شود. همین مسائل زمینه‌ی ورود روش‌های بهینه‌سازی مدرن را در حوزه‌ی کنترل فراهم می‌کند. هزینه‌ی ایجاد و نگهداری از تاسیسات یا ساختمان و توان موردنیاز برای ایجاد سیستم کنترل سازه‌ای از دلایل دیگر گرایش به استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی در مسائل کنترل محسوب می‌شود.

در بهینه‌سازی مسائل کنترل سازه‌ها به مواردی از قبیل مکان و تعداد محرک‌ها و بزرگی نیروی کنترل توجه می‌شود. ضمن اینکه می‌توان قیود دیگر طراحی مانند تغییر مکان، شتاب و ... را نیز وارد معادلات نمود. پورزینلی و همکاران در سال ۲۰۰۷ [12] برای بهینه‌سازی و طراحی پارامترهای میراگر جرم فعال ATMD³ از منطق فازی و الگوریتم ژنتیک بهره گرفته‌اند. Ribakov و Dancygier در سال ۲۰۰۳ [13]، از کنترلر فعال چندجمله‌ای برای یافتن نیروهای کنترل بهینه در گام‌های زمانی زلزله استفاده کردند. مجبی و جغتایی [14] برای طراحی بهینه‌ی پارامترهای میراگر TMD⁴ در قاب‌های غیرخطی از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. امینی و همکاران [15] روشی برای یافتن

3 . Active Tuned Mass Damper

4 . Tuned Mass Damper

1 . Linear Quadratic Regulator

2 . Linear Quadratic Guassian

ممکن می‌سازد.

۲- مدل‌سازی سازه‌ی مجهز به سیستم کنترل فعال

معادله‌ی دینامیکی ارتعاش سازه‌ی مجهز به سیستم کنترل فعال تحت نیروهای زلزله به شکل رابطه‌ی (۱) نمایش داده می‌شود:

در این رابطه M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه، \ddot{x} و \dot{x} و x به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و تغییر مکان و \ddot{x}_g بردار ضرایب شتاب حرکت زمین، U بردار نیروهای کنترل، H بردار محل اعمال نیروهای کنترل و Γ بردار موقعیت نیروهای خارجی وارد بر سیستم (نیروهای زلزله) است.

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -M\Gamma\ddot{x}_g + HU \quad (1)$$

تبدیل با استفاده از بردار حالت $Z = [X, \dot{X}]^T$ معادلات حرکت مرتبه‌ی دوم را به فرم مرتبه‌ی اول فضای حالت به شکل رابطه‌ی (۲) تبدیل می‌کند. با این انتقال تعداد مجهولات مساله دو برابر می‌شود که برای حل این معادلات نیاز به n معادله‌ی اضافی است. این معادلات قانون کنترل پس‌خور نامیده می‌شوند.

$$A = \begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad (2) \text{ در رابطه‌ی } \\ \text{ماتریس سیستم، } B = \begin{bmatrix} O \\ M^{-1}H \end{bmatrix}_{2n \times n} \text{ ماتریس تاثیر کنترل و}$$

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + BU(t) + E\ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

$$E = \begin{bmatrix} O \\ -M^{-1}\Gamma \end{bmatrix}_{2n \times n} \text{ ماتریس تاثیر تحریک زلزله است.} \\ H = \{1\}_{n \times 1} \text{ و } \Gamma = \{1\}_{n \times 1}$$

شاخص عملکرد LQR به عنوان معیاری برای برقراری تعادل بین میزان کاهش پاسخ سیستم و کاهش انرژی کنترلی به صورت رابطه‌ی (۳) تعریف می‌شود. با بهینه‌سازی این شاخص مرتبه‌ی دوم، ماتریس G رابطه‌ی (۴) که ماتریس

نیروی کنترل بهینه‌ی میراگر ATMD ارائه دادند که از سه روش تبدیل موجک گسسته DWT، بهینه‌سازی حرکت جمعی ذرات (PSO) و کنترلر LQR استفاده می‌کند. جغتایی و محبی [16] الگوریتم کنترل فعال بهینه‌ای را برای کنترل سازه‌های غیرخطی براساس روش انتگرال‌گیری غیرخطی نیومارک و الگوریتم ژنتیک توزیع‌شده^۱ ارائه داده‌اند که در آن ماتریس وزنی Q به کمک الگوریتم ژنتیک توزیع یافته تعیین می‌شود. در برخی مطالعات نیز از بهینه‌سازی در یافتن تعداد و آرایش بهینه‌ی محرک‌ها استفاده شده است [17]. باقری و امینی [18] الگوریتم کنترل نوینی ارائه کردند که با ترکیب روش کنترل کلاسیک LQR و الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی الگو^۲ نیروهای کنترل بهینه را محاسبه می‌نماید. در این روش پس از تجزیه‌ی زلزله سطح خطر یکنواخت مصنوعی به وسیله‌ی تبدیل موجک، عناصر ماتریس بهره‌ی کنترل در هر باند فرکانسی به وسیله‌ی روش جستجوی الگو بدست آمده و در محاسبه‌ی نیروی کنترل به کار گرفته می‌شوند. Amini و Bagheri [19] با هدف یافتن نیروی کنترل بهینه، برای محاسبه‌ی عناصر ماتریس بهره از الگوریتم رقابت استعماری استفاده کرده‌اند. اعمال الگوریتم ژنتیک برای تعیین ضرایب بهینه‌ی معادلات چند جمله‌ای نیروی کنترل [20] و استفاده از GA^۳ و SA^۴ برای یافتن بهره‌های کنترل‌کننده‌ی بهینه [21] از دیگر کاربردهای روش‌های بهینه‌سازی در زمینه‌ی کنترل سازه‌ها است.

هدف از این پژوهش طراحی سیستم کنترل فعال بهینه‌ای است که برخلاف روش LQR بدون چشم‌پوشی از آثار تحریک زلزله سیگنال کنترل را محاسبه می‌نماید. در این راستا ابتدا معادلات دینامیکی سازه‌ی مجهز به کنترلر فعال نوشته شده و سپس ماتریس بهره‌ی کنترلر با هدف کمینه کردن شاخص عملکرد به جای روش لاگرانژ به وسیله‌ی روش بهینه‌سازی تکامل تفاضلی محاسبه می‌شود. عدم نیاز به حل معادله‌ی ریکاتی و روند تکراری روش پیشنهادی در نظر گرفتن اثر تحریک خارجی را در محاسبه‌ی مقادیر نیروهای کنترل بهینه

1. Distributed Genetic Algorithm
2. Pattern Search
3. Genetic Algorithm
4. Simulated Annealing

فضاهای بزرگ در زمان کم، عدم نیاز به مشتق (گرادیان) تابع هدف، توانایی گریز از نقاط بهینه‌ی محلی، هزینه‌ی محاسباتی کم، قابلیت کار با متغیرهای تصمیم زیاد، بهینه‌سازی در فضای گسسته یا پیوسته، بهینه‌سازی توابع بسیار پیچیده، ریاضیات آسان و استفاده از قوانین احتمالی در فرآیند جستجو به جای قوانین قطعی اشاره کرد.

روش بهینه‌سازی تکامل تفاضلی (DE) یکی از تکنیک‌های نسبتاً جدید بهینه‌سازی فراکاوشی است که در سال ۱۹۹۵ به وسیله‌ی *storn* و *price* ارائه شد. این الگوریتم کار خود را با تشکیل یک جمعیت آغازین تصادفی از محدوده‌ی از پیش تعیین شده، آغاز می‌کند. هر انتخاب (عضو) بیانگر یک جواب کاندید برای مسأله‌ی بهینه‌سازی است که با اعمال اپراتورهای الگوریتم در تکرارهای بعدی موقعیت اعضا بهبود یافته و جمعیت به سمت جواب بهینه هدایت می‌شود. الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) پیشرفته‌تر از الگوریتم ژنتیک محسوب می‌شود. یکی از تفاوت‌های اصلی GA و DE در عملگر انتخاب است. در GA انتخاب والد بسته به میزان شایستگی عضو دارد. اما در DE همه‌ی اعضا شانس برابر برای انتخاب شدن دارند. برخلاف GA، در DE گام‌های جهش از توزیع احتمالی مشخصی پیروی نمی‌کند بلکه از تفاضل میان اعضای جمعیت برای هدایت فرآیند جستجو استفاده می‌شود. همین مسأله میزان مشارکت اعضای جمعیت در یافتن پاسخ‌های بعدی را افزایش می‌دهد. یکی دیگر از تفاوت‌های DE و GA ترتیب اعمال عملگرهای جهش و تقاطع است. در DE والدین در جهش و قبل از عمل تقاطع ایجاد می‌شوند. اما در GA والدین از جمعیت کنونی انتخاب شده و سپس عمل تقاطع و جهش روی آن‌ها انجام می‌گیرد. این تفاوت‌ها موجب شده است که الگوریتم تکامل تفاضلی حتی موثرتر از GA و SA ارزیابی شود [22].

با وجود مزایای فراوان، این الگوریتم تاکنون در مسائل مهندسی عمران به ویژه مبحث کنترل سازه‌ها بطور گسترده و منسجم استفاده نشده است.

بهره‌ی فیدبک نامیده می‌شود به دست آمده و طبق رابطه‌ی (۵) در تعیین نیروهای کنترل بکار گرفته می‌شود. مسأله‌ی کلیدی در روش LQR، یافتن ماتریس بهره‌ی G است که از طریق بهینه کردن شاخص عملکرد J به دست می‌آید. P ماتریس مربعی مثبت معین و پاسخ معادله‌ی دیفرانسیل ریکاتی RDE¹ است که ماتریس ریکاتی نامیده می‌شود.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (Z^T Q Z + U^T R U) dt \quad (3)$$

$$\{U(t)\}_{n \times 1} = -[G]_{n \times 2n} \{Z(t)\}_{2n \times 1} \quad (4)$$

$$G = R^{-1} B^T P \quad (5)$$

Q و R به ترتیب ماتریس‌های وزنی مربوط به پاسخ‌ها و نیروهای کنترلی هستند و مقادیر آنها بیانگر اهمیت نسبی کاهش پاسخ یا نیروی کنترلی است. عملکرد کنترلر به شدت تحت تاثیر انتخاب ماتریس‌های وزنی است. در عمل انتخاب ماتریس‌های وزنی به کمک سعی و خطا و به کمک تجربه‌ی طراح صورت می‌گیرد. Q ماتریس وزنی مربعی نیمه مثبت معین با بعد 2n (تعداد حالات سیستم) $(\det(Q) \geq 0)$ و R ماتریس وزنی مربعی مثبت معین $(\det(R) > 0)$ با بعد r است که r تعداد محرک‌ها است.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی

الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی الگوریتم‌هایی بر مبنای جستجوی تصادفی است که از تکامل بیولوژیکی موجودات در فرآیند جستجو الگوبرداری می‌کنند. تصادف جزء کارآمد این الگوریتم‌های جستجوی جهانی است. شناخته‌ترین الگوریتم تکاملی، الگوریتم ژنتیک است. روش‌های جستجوی هدایت شده مانند روش‌های متاهوریستیک جزء روش‌های هوشمند بهینه‌سازی هستند که از اطلاعات کسب شده در روند جستجو به عنوان راهنمایی برای انتخاب نقطه یا نقاط مناسب بعدی بهره می‌گیرند و قابلیت حل مسائل پیچیده را دارند. از قابلیت‌های این روش‌ها می‌توان به توانایی جستجوی موثر

1 . Riccati Differential Equation

نسبت به حالت کنترل نشده هستند. شاخص‌های J_5 ، J_6 ، J_7 و J_8 به ترتیب بیانگر میزان کاهش میانگین جذر مربعات دررفت بین طبقه‌ای، تغییر مکان، شتاب و برش طبقات هستند. پارامتر J_9 نیز نسبت نیروی کنترلی ماکزیمم به وزن سازه است.

در مدل‌سازی مساله فرضیه‌های زیر بکار گرفته می‌شود:

- ۱- رفتار سازه رفتار برشی خطی است.
 - ۲- بردار اثر تحریک زلزله در معادله ارتعاش سیستم و معادلات فضای حالت وارد می‌شود.
 - ۳- از اثر تاخیر زمانی چشم‌پوشی می‌شود.
- پارامترهای روش بهینه‌سازی DE که در این مساله استفاده می‌شود در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱) پارامترهای مربوط به روش بهینه‌سازی فراکوشی DE

population size	25
maximum scale factor	0.8
minimum scale factor	0.2
crossover rate	0.2

Table 1: The parameters of Differential Evolution (DE) algorithm

۵- شبیه‌سازی عددی

بمنظور بررسی کارایی کنترلی، ارتعاشات دو سازه‌ی دو و ده درجه‌ی آزادی (شکل‌های ۱ و ۲) تحت تاثیر شتاب‌نگاشت‌های شکل (۳) با کنترلی پیشنهادی کنترل می‌شود.

شکل (۱) سازه‌ی دو درجه‌ی آزادی (2DOF) مجهز به سیستم کنترل تاندون فعال

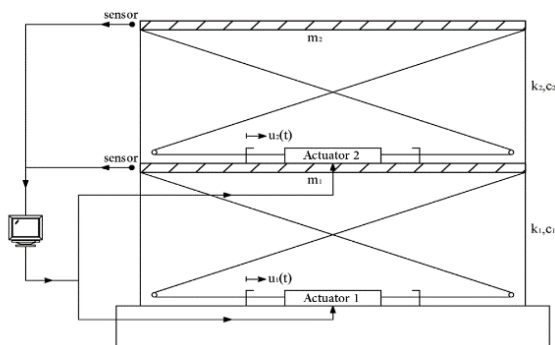


Fig. 1: The two-story shear frame (2 DOF) with active tendon

۴- اعمال بهینه‌سازی به مساله‌ی کنترل فعال

مساله‌ی طراحی کنترلی در این پژوهش، انتخاب و تعیین بهینه‌ی المان‌های ماتریس بهره‌ی پس‌خور با استفاده از روش بهینه‌سازی تکامل تفاضلی است. بدین منظور شاخص عملکرد مرتبه‌ی دوم J به عنوان تابع هزینه به وسیله‌ی روش DE مینیمم می‌شود. پس از محاسبه‌ی ماتریس بهره به وسیله‌ی الگوریتم پیشنهادی، پاسخ‌های کنترل نشده‌ی سازه و پاسخ‌های کنترل شده با روش پیشنهادی تحت تاثیر زلزله‌های تاریخی محاسبه شده و نتایج بدست آمده با روش LQR مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

به منظور ارزیابی عملکرد سیستم کنترلی، مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکرد پنج‌مارک برای مقایسه‌ی پاسخ‌های کنترل شده و کنترل نشده تعریف شده‌اند. این شاخص‌ها براساس ماکزیمم پاسخ‌ها و نُرم پاسخ‌ها تعریف می‌شوند [22] و فرمول محاسبه‌ی آن‌ها در زیر آمده است.

$$J_1 = \frac{\max_{t,i} |d_i^c(t)|}{\max_{t,i} h_i} \quad J_2 = \frac{\max_{t,i} |x_i^c(t)|}{\max_{t,i} |x_i^{uc}(t)|} \quad J_3 = \frac{\max_{t,i} |\ddot{x}_{ai}^c(t)|}{\max_{t,i} |\ddot{x}_{ai}^{uc}(t)|}$$

$$J_4 = \frac{\max_t \left| \sum_i m_i \ddot{x}_{ai}^c(t) \right|}{\max_t \left| \sum_i m_i \ddot{x}_{ai}^{uc}(t) \right|} \quad J_5 = \frac{\max_{t,i} \left\| \frac{d_i^c(t)}{h_i} \right\|}{\max_{t,i} \left\| \frac{d_i^{uc}(t)}{h_i} \right\|} \quad J_6 = \frac{\max_{t,i} \|x_i^c(t)\|}{\max_{t,i} \|x_i^{uc}(t)\|}$$

$$J_7 = \frac{\max_{t,i} \|\ddot{x}_{ai}^c(t)\|}{\max_{t,i} \|\ddot{x}_{ai}^{uc}(t)\|} \quad J_8 = \frac{\max_t \left\| \sum_i m_i \ddot{x}_{ai}^c(t) \right\|}{\max_t \left\| \sum_i m_i \ddot{x}_{ai}^{uc}(t) \right\|} \quad J_9 = \frac{\max_{t,i} |f_i(t)|}{W}$$

$d_i(t)$ ، $x_i(t)$ ، $\ddot{x}_i(t)$ و m_i به ترتیب دررفت، ارتفاع، تغییر مکان، شتاب و جرم طبقه‌ی i ام، $f_i(t)$ نیروی کنترل تولید شده به وسیله‌ی محرک i ام و W نماینده‌ی وزن سازه است. حروف c و uc به ترتیب مربوط به حالت کنترل-شده و کنترل نشده است. عبارت \max به معنی اپراتور ماکزیمم، علامت $\| \cdot \|$ به معنی عملیات قدرمطلق روی $*$ و $\| \cdot \|$ نماد عملگر میانگین جذر مربعات (RMS) روی $*$ است.

شاخص J_1 برای بررسی توانمندی کنترلی در کاهش ماکزیمم دررفت بین طبقه‌ای نسبت به حالت کنترل نشده تعریف می‌شود. شاخص‌های J_2 ، J_3 ، J_4 به ترتیب نماینده‌ی کاهش بیشینه‌ی پاسخ تغییر مکان، شتاب و برش پایه‌ی سازه

شکل (۳) تاریخچه‌ی زمانی رکوردهای زلزله‌ی اعمال شده به سازه‌های

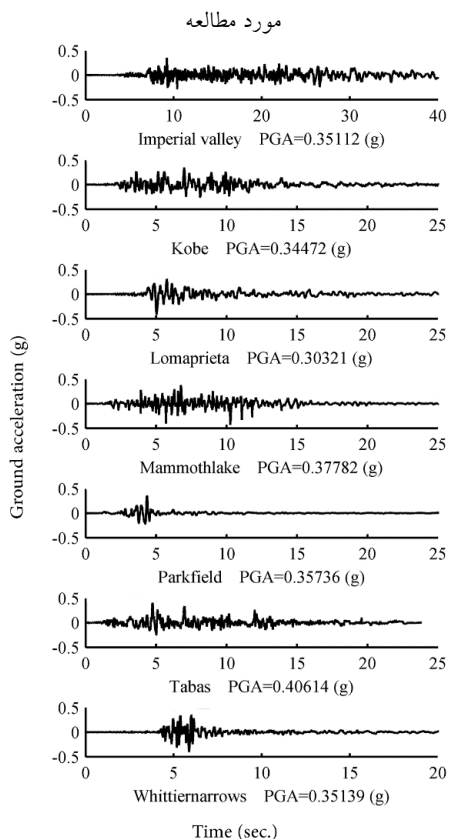


Fig. 3: Time histories of historical earthquake records used in this study

۵-۱- سازه‌ی دو درجه آزادی
 ۵-۱-۱- سازه‌ی دو درجه آزادی تحت تحریک زلزله‌ی Imperialvalley
 با تحریک سازه‌ی دو درجه آزادی به وسیله‌ی شتاب-نگاشت زلزله‌ی Imperialvalley، پاسخ‌های کنترل‌نشده و کنترل‌شده‌ی سازه با کنترلر پیشنهادی بدست آمده و نیروی کنترلی محاسبه شده است. شکل‌های (۴ تا ۶) تاریخچه‌ی زمانی پاسخ‌های سازه و شکل (۷) تاریخچه‌ی زمانی نیروی کنترلی مورد نیاز را نمایش می‌دهد.

شکل (۴) پاسخ تغییرمکان طبقه‌ی دوم سازه‌ی 2DOF تحت تحریک زلزله‌ی Imperialvalley

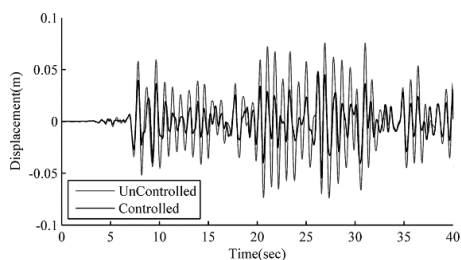


Fig. 4: The displacement response of top story (2DOF) under Imperialvalley earthquake

شکل (۲) سازه‌ی ده درجه آزادی (10DOF) مجهز به سیستم کنترل تاندون

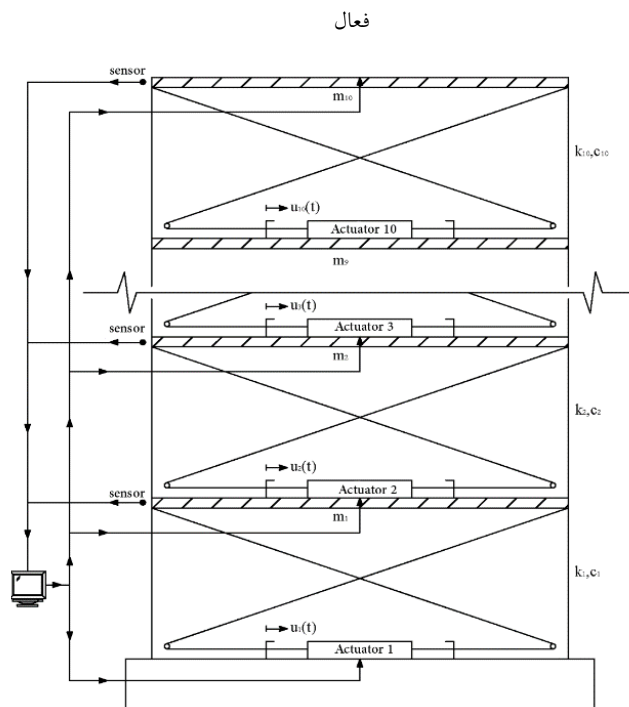


Fig. 2: The ten-story shear frame (10 DOF) with active tendon

جدول (۲) مشخصات دینامیکی سازه‌ی دو درجه آزادی

story	story mass (kg)	story stiffness (kN/m)	story height (m)
1-2	50000	8000	3.00

Table 2: Structural properties of two-story shear frame

نسبت میرایی ۵ درصد فرض می‌شود.

جدول (۳) مشخصات دینامیکی سازه‌ی ده درجه آزادی

story	story mass (kg)	story stiffness (kN/m)	story height (m)
1-5	60000	12000	3.00
6-10	60000	8000	3.00

Table 3: Structural properties of ten-story shear frame

نسبت میرایی ۳ درصد فرض می‌شود.

محرک‌ها در تمام طبقات قرار داشته و بنابراین نیروی کنترلی در تمام درجات آزادی اعمال می‌شود.
 با کدنویسی در محیط نرم‌افزار متلب پاسخ‌های کنترل‌شده و کنترل‌نشده‌ی سازه تحت تاثیر شتاب‌نگاشت‌های معرفی شده محاسبه می‌شوند.

روند بهینه‌یابی تابع هدف بهینه‌سازی به وسیله‌ی الگوریتم تکامل تفاضلی در شکل (۸) نمایش داده شده است. ماکزیمم پاسخ‌های سازه در جدول (۴) و شاخص‌های عملکرد ۹ گانه برای این سازه در دو حالت کنترل‌کننده‌ی LQR و کنترلر پیشنهادی در جدول (۵) آورده شده است. همچنین به دلیل ماهیت تصادفی کنترلر مبتنی بر الگوریتم تکامل تفاضلی میانگین ۱۰ بار اجرای الگوریتم نیز محاسبه شده و در جداول آمده است.

جدول (۴) پاسخ‌های ماکزیمم سازه‌ی دو درجه آزادی تحت تحریک زلزله-

Imperialvalley ی				
	J	$D_{max}(mm)$	$V_{max}(mm/sec)$	$U_{max}(kN)$
LQR	2.0398	57.8899	543.9438	52.1481
DE	2.0275	54.6973	516.9333	51.0561
average	2.0308	55.0523	521.3245	50.8276

Table 4: Maximum responses of two-story shear frame under Imperialvalley earthquake

در این جدول J شاخص عملکرد مرتبه‌ی دوم و D_{max} ، V_{max} و U_{max} به ترتیب ماکزیمم تغییر مکان، ماکزیمم سرعت و نیروی کنترل پیشنهادی طبقه‌ی دوم سازه است.

جدول ۵: شاخص‌های عملکرد سازه‌ی دو درجه آزادی تحت تحریک

زلزله‌ی Imperialvalley			
	LQR	DE	average
J_1	0.7322	0.6863	0.6943
J_2	0.7543	0.7111	0.7167
J_3	0.867	0.8282	0.8335
J_4	0.8936	0.8516	0.8589
J_5	0.5552	0.5262	0.5270
J_6	0.5491	0.5192	0.5223
J_7	0.6406	0.6149	0.6158
J_8	0.633	0.6057	0.6103
J_9	0.0532	0.052	0.0518

Table 5: Performance Indexes of two-story shear frame under Imperialvalley earthquake

نتایج حاصل از اعمال کنترلر پیشنهادی بیانگر کاهش در ماکزیمم پاسخ‌های تغییر مکان و سرعت سازه در مقایسه با روش LQR می‌باشد. همچنین نیروی کنترل ماکزیمم مورد نیاز نیز در مقایسه با روش LQR کاهش یافته است. نتایج بدست

شکل (۵) پاسخ سرعت طبقه‌ی دوم سازه‌ی 2DOF تحت تحریک زلزله‌ی

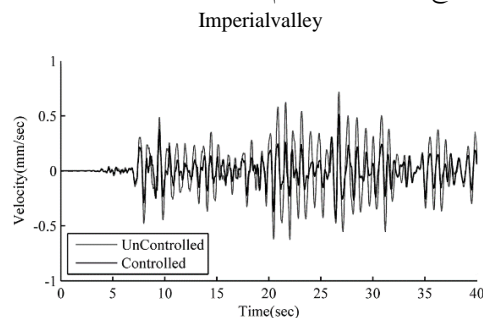


Fig. 5: The velocity response of top story (2DOF) under Imperialvalley earthquake

شکل (۶) پاسخ شتاب طبقه‌ی دوم سازه‌ی 2DOF تحت تحریک زلزله‌ی

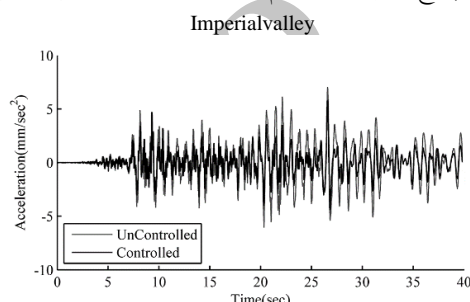


Fig. 6: The acceleration response of top story (2DOF) under Imperialvalley earthquake

شکل (۷) نیروی کنترل طبقه‌ی دوم سازه‌ی 2DOF تحت تحریک زلزله‌ی

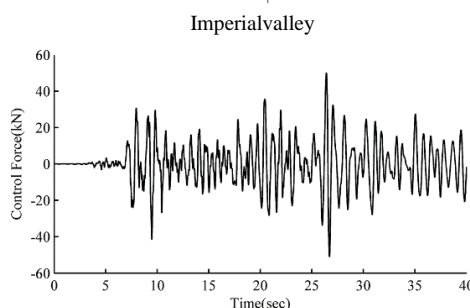


Fig. 7: The required control force at top story (2DOF) under Imperialvalley earthquake

شکل (۸) روند بهینه‌سازی شاخص عملکرد سازه‌ی 2DOF تحت تحریک

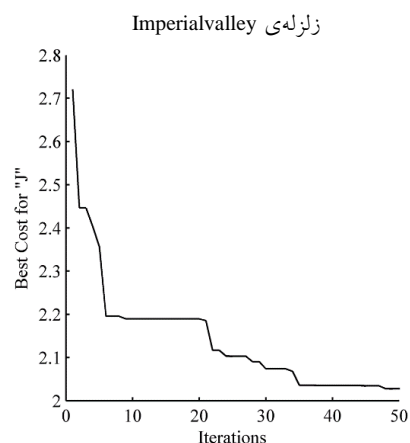


Fig. 8: The convergence curve of the performance index (2DOF) under Imperialvalley earthquake

شکل (۱۳) روند بهینه‌سازی شاخص عملکرد سازه‌ی 2DOF تحت تحریک

زلزله‌ی Lomaprieta

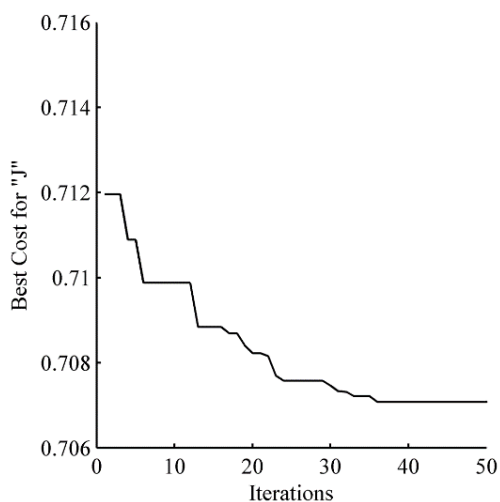


Fig. 13: The convergence curve of the performance index (2DOF) under Lomaprieta earthquake

جدول ۶: پاسخ‌های ماکزیمم سازه‌ی دو درجه آزادی تحت تحریک زلزله‌ی

Lomaprieta				
	J	D_{max} (mm)	V_{max} (mm/sec)	U_{max} (kN)
LQR	0.7159	54.3281	434.9845	41.8218
DE	0.7071	53.7566	430.819	40.6933
average	0.7071	53.8019	431.0046	40.8010

Table 6: Maximum responses of two-story shear frame under Lomaprieta earthquake

جدول ۷: شاخص‌های عملکرد سازه‌ی دو درجه آزادی تحت تحریک

زلزله‌ی Lomaprieta

Lomaprieta			
	LQR	DE	average
J_1	0.6346	0.6218	0.6220
J_2	0.6877	0.6787	0.6792
J_3	0.8713	0.877	0.8759
J_4	0.8942	0.8778	0.8789
J_5	0.4578	0.44447	0.4453
J_6	0.4654	0.4522	0.4527
J_7	0.5899	0.5815	0.5809
J_8	0.5704	0.5556	0.5563
J_9	0.0426	0.0415	0.0416

Table 7: Performance Indexes of two-story shear frame under Lomaprieta earthquake

۵-۲- سازه‌ی ده درجه آزادی

۵-۲-۱- سازه‌ی ده درجه آزادی تحت تحریک زلزله‌ی Parkfield

جداول بیانگر کارایی کنترلر پیشنهادی در کاهش بیشینه‌ی پاسخ‌ها و انرژی کنترل برای این سازه تحت تحریک زلزله‌ی

آمده برای شاخص‌های عملکرد نیز بهبود این مقادیر را برای کنترلر مبتنی بر DE در مقایسه با روش کلاسیک LQR نشان می‌دهد.

۵-۱-۲- سازه‌ی دو درجه آزادی تحت تحریک زلزله‌ی Lomaprieta

شکل (۹) پاسخ تغییر مکان طبقه‌ی دوم سازه‌ی 2DOF تحت تحریک زلزله‌ی

Lomaprieta

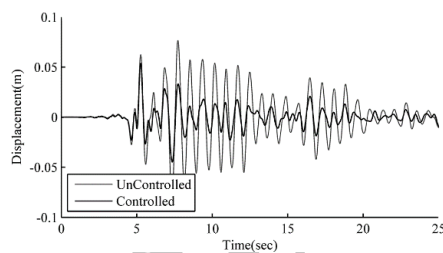


Fig. 9: The displacement response of top story (2DOF) under Lomaprieta earthquake

شکل (۱۰) پاسخ سرعت طبقه‌ی دوم سازه‌ی 2DOF تحت تحریک زلزله‌ی

Lomaprieta

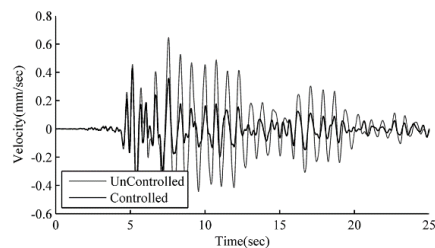


Fig. 10: The velocity response of top story (2DOF) under Lomaprieta earthquake

شکل (۱۱) پاسخ شتاب طبقه‌ی دوم سازه‌ی 2DOF تحت تحریک زلزله‌ی

Lomaprieta

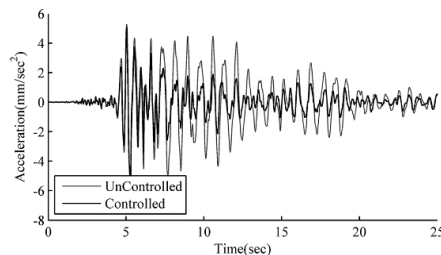


Fig. 11: The acceleration response of top story (2DOF) under Lomaprieta earthquake

شکل (۱۲) نیروی کنترل طبقه‌ی دوم سازه‌ی 2DOF تحت تحریک زلزله‌ی

Lomaprieta

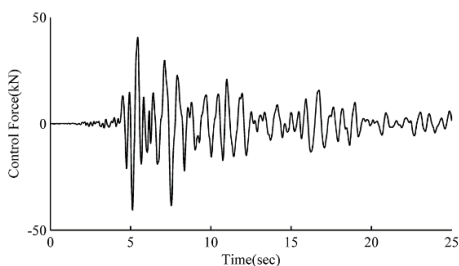


Fig. 12: The required control force at top story (2DOF) under Lomaprieta earthquake

شکل (۱۸) روند بهینه‌سازی شاخص عملکرد سازی 10DOF تحت

تحریک زلزله‌ی Parkfield

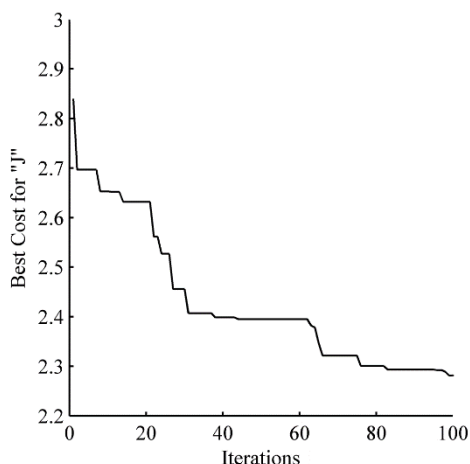


Fig 18: The convergence curve of the performance index (10DOF) under Parkfield earthquake

جدول ۸: پاسخ‌های ماکزیمم سازی ده درجه آزادی تحت تحریک زلزله‌ی

Parkfield

	J	$D_{max}(mm)$	$V_{max}(mm/sec)$	$U_{max}(kN)$
LQR	2.6968	23.0211	167.7452	165.9147
DE	2.2813	18.6649	117.4567	154.462
average	2.2922	17.5536	118.8966	160.1096

Table 8: Maximum responses of ten-story shear frame under Parkfield earthquake

جدول ۹: شاخص‌های عملکرد سازی ده درجه آزادی تحت تحریک زلزله-

ی Parkfield

	LQR	DE	average
J_1	0.5029	0.2741	0.3204
J_2	0.1987	0.1322	0.1393
J_3	0.5474	0.4659	0.4673
J_4	0.6933	0.4579	0.4817
J_5	0.1354	0.1009	0.1070
J_6	0.1926	0.1325	0.1389
J_7	0.3747	0.2754	0.2915
J_8	0.5369	0.3517	0.3675
J_9	0.0309	0.0349	0.0365

Table 9: Performance Indexes of ten-story shear frame under Parkfield earthquake

با اعمال کنترلر بهینه، مقدار ماکزیمم تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی سازی ده درجه آزادی با اعمال ۶ درصد نیروی کنترلی کمتر در مقایسه با روش LQR تا ۱۸ درصد و سرعت طبقه تا ۲۹ درصد کاهش یافته است.

Lomapieta نسبت به روش LQR است.

شکل (۱۴) پاسخ تغییر مکان طبقه‌ی دهم سازی 10DOF تحت تحریک

زلزله‌ی Parkfield

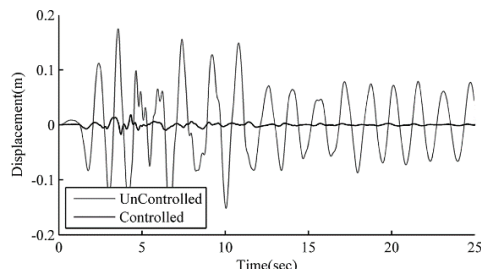


Fig 14: The displacement response of top story (10DOF) under Parkfield earthquake

شکل (۱۵) پاسخ سرعت طبقه‌ی دهم سازی 10DOF تحت تحریک زلزله-

ی Parkfield

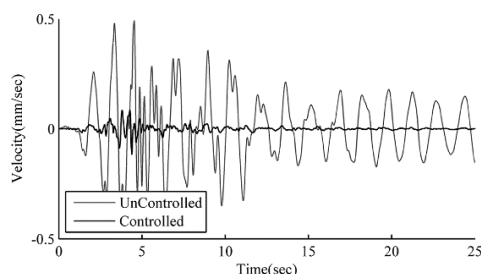


Fig 15: The velocity response of top story (10DOF) under Parkfield earthquake

شکل (۱۶) پاسخ شتاب طبقه‌ی دهم سازی 10DOF تحت تحریک زلزله‌ی

Parkfield

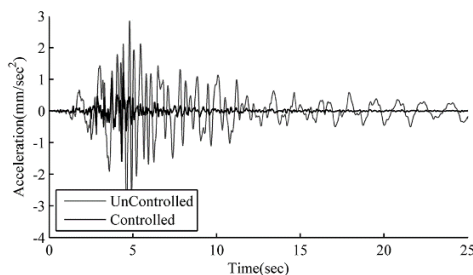


Fig 16: The acceleration response of top story (10DOF) under Parkfield earthquake

شکل (۱۷) نیروی کنترل طبقه‌ی دهم سازی 10DOF تحت تحریک زلزله‌ی

Parkfield

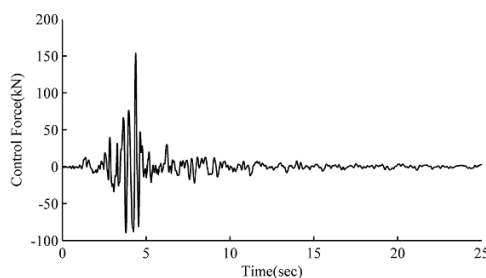


Figure 17: The required control force at top story (10DOF) under Parkfield earthquake

جدول (۱۲) درصد کاهش شاخص‌های عملکرد سازه‌ی دو درجه آزادی

نسبت به روش LQR تحت زلزله‌های مورد مطالعه

	Kobe	Mammoth lake	Parkfield	Tabas	Whittier narrows
J ₁	3.89	1.17	0.48	1.63	3.49
J ₂	3.37	0.75	0.68	0.88	1.57
J ₃	-6.76	-0.98	2.34	-0.3	5.76
J ₄	-1.11	0.48	2.88	1.33	3.75
J ₅	4.12	1.08	-1.53	1.92	1.53
J ₆	-0.39	1.19	-4.07	1.39	2.46
J ₇	-4.54	-0.18	-3.04	0.14	3.8
J ₈	-.01	1.24	-2.51	0.78	1.9
J ₉	8.12	0.91	50.64	6.05	9.8

Table 12: Reduction percentage of performance indexes compared to LQR for two-story shear frame under studied earthquakes

جدول (۱۳) درصد کاهش شاخص‌های عملکرد سازه‌ی ده درجه آزادی

نسبت به روش LQR تحت زلزله‌های مورد مطالعه

	Imperial valley	Kobe	Loma prieta	Mammoth lake	Tabas	Whittier narrows
J ₁	71.6	48.07	30.39	50.7	54.61	66.47
J ₂	53.48	15.97	10.19	24.52	42.05	59.61
J ₃	51.58	29.79	13.33	31.08	41.78	49.76
J ₄	48.53	28.85	18.28	25.24	36.64	58.48
J ₅	57.54	23.71	20.71	33.41	34.89	51.89
J ₆	54.17	20.47	13.23	25.02	44.58	58.11
J ₇	46.86	12.97	4.25	15.6	29.98	53.07
J ₈	51.47	28.32	18.33	24.15	33.05	60.4
J ₉	-10.09	-15.65	-9.16	-10.03	-	-14.38

Table 13: Reduction percentage of performance indexes compared to LQR for ten-story shear frame under studied earthquakes

۶- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد کنترلر پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم تکامل تفاضلی در مقایسه با روش LQR با کنترل ارتعاشات دو سازه تحت ۷ زلزله‌ی مهم ارزیابی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی بیانگر عملکرد مناسب این روش در دستیابی به پاسخ‌های بهینه با صرف انرژی کنترلر کمتری است. قابلیت‌های روش DE و توانایی کنترلر در لحاظ نمودن اثر تحریک خارجی در محاسبات از جمله ویژگی‌های این کنترلر محسوب می‌شود که نتایج رضایت‌بخشی را نسبت به روش LQR سبب شده است.

جدول (۱۰) پاسخ‌های ماکزیمم سازه‌ی دو درجه آزادی تحت تحریک

زلزله‌های مطالعه شده

		J	D _{max} (mm)	V _{max} (mm/sec)	U _{max} (kN)
Imperial valley	LQR	2.0398	57.8899	543.9438	52.1481
	DE	2.0275	54.6973	516.9333	51.0561
Kobe	LQR	0.3901	27.8889	238.3637	48.7784
	DE	0.3884	27.0115	241.3711	44.8177
Lomapieta	LQR	0.7159	54.3281	434.9845	41.8218
	DE	0.7071	53.7566	430.819	40.6933
Mammoth lake	LQR	0.5904	41.6521	330.9969	31.9844
	DE	0.5843	41.4049	324.9336	31.6921
Parkfield	LQR	0.1320	24.5515	279.2272	26.6465
	DE	0.1138	24.3645	283.0937	13.1525
Tabas	LQR	0.7587	46.3956	424.4849	41.3702
	DE	0.7542	46.0931	418.6984	38.8689
Whittier narrows	LQR	0.1378	27.3727	279.1892	58.2020
	DE	0.1368	27.1782	279.8755	52.4956

Table 10: Maximum responses of two-story shear frame under studied earthquakes

جدول (۱۱) پاسخ‌های ماکزیمم سازه‌ی ده درجه آزادی تحت تحریک

زلزله‌های مطالعه شده

		J	D _{max} (mm)	V _{max} (mm/sec)	U _{max} (kN)
Imperial valley	LQR	2.1843	12.1022	59.8450	195.549
	DE	1.5326	8.5599	55.192	183.623
Kobe	LQR	1.2970	10.5788	61.4210	193.164
	DE	1.2180	9.9724	65.6596	190.1773
Lomapieta	LQR	2.0027	25.3645	79.2757	245.9689
	DE	1.8515	22.6424	67.8960	211.4200
Mammoth lake	LQR	2.0643	19.4617	73.4676	244.8707
	DE	1.7624	16.7939	79.2689	218.1853
Parkfield	LQR	2.6968	23.0211	167.7452	165.9147
	DE	2.2813	18.6649	117.4567	154.462
Tabas	LQR	0.9798	7.9150	103.2541	183.748
	DE	0.8996	5.7669	82.1539	179.5372
Whittier narrows	LQR	10.7938	50.68	223.8459	228.1499
	DE	7.9878	23.9121	105.3745	204.4482

Table 11: Maximum responses of ten-story shear frame under studied earthquakes

۷- مراجع

References

- [14] Mohebbi, M. & Joghataie, A. 2012 Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **21**(1), 57-76.
- [15] Amini, F., Hazaveh, K. & Rad, A.A. 2013 Wavelet PSO-Based LQR Algorithm for Optimal Structural Control Using Active Tuned Mass Dampers. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **28**, 542-557.
- [16] Joghataie, A. & Mohebbi, M. 2012 Optimal control of nonlinear frames by Newmark and distributed genetic algorithms. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **21**(2), 77-95.
- [17] Wongprasert, N. & Symans, M. 2004 Application of a genetic algorithm for optimal damper distribution within the nonlinear seismic benchmark building. *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(4), 401-406.
- [18] Bagheri, A. & Amini, F. 2013 Control of structures under uniform hazard earthquake excitation via wavelet analysis and pattern search method. *Structural Control and Health Monitoring*, **20**(5), 671-685.
- [19] Amini, F. & Bagheri, A. 2012 Optimal control of structures under earthquake excitation based on the colonial competitive algorithm. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*.
- [20] Cha, Y.J. & Agrawal, A.K. 2013 Decentralized output feedback polynomial control of seismically excited structures using genetic algorithm. *Structural Control and Health Monitoring*, **20**(3), 241-258.
- [21] Kundu, S. & Kawata, S. 1996 Genetic algorithms for optimal feedback control design. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **9**(4), 403-411.
- [22] Storn, R. & Price, K. 1997 Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, **11**(4), 341-359.
- [23] Ohtori, Y., Christenson, R., Spencer Jr, B. & Dyke, S. 2004 Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings. *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(4), 366-385.
- [1] Yang, J.N., Akbarpour, A. & Ghaemmaghami, P. 1987 New optimal control algorithms for structural control. *Journal of Engineering Mechanics*, **113**(9), 1369 1386.
- [2] Basu, B. & Nagarajaiah, S. 2008 A wavelet based time varying adaptive LQR algorithm for structural control. *Engineering Structures*, **30**, 2470 2477.
- [3] Amini, F. & Tavassoli, M.R. 2005 Optimal structural active control force, number and placement of controllers. *Engineering structures*, **27**(9), 1306 1316.
- [4] Athans, M. 1966 The status of optimal control theory and applications for deterministic systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, **11**(3), 580 596.
- [5] Kumar, M.S. & Vijayarangan, S. 2006 Design of LQR controller for active suspension system. *Indian journal of engineering and materials sciences*, **13**(3), 173.
- [6] Mousanejad, T. & Pourzeynali, S. 2008 کنترل لرزه ای ساختمانهای بلند با استفاده از میراگرهای ویسکوز نیمه فعال (Seismic control of tall buildings using semi active viscous dampers) in 4th National Civil Engineering Conference, Tehran, Iran, (In Persian).
- [7] Younespour, A. & Ghaffarzadeh, H. 2014 Structural active vibration control using active mass damper by block pulse functions. *Journal of Vibration and Control*, 1077546313519285.
- [8] Ghaboussi, J. & Joghataie, A. 1995 Active control of structures using neural networks. *Journal of Engineering Mechanics*, **121**(4), 555 567.
- [9] Joghataie, A., Neural networks and fuzzy logic for structural control. 1994, University of Illinois Engineering Experiment Station. College of Engineering. University of Illinois at Urbana Champaign.
- [10] Bani Hani, K. & Ghaboussi, J. 1998 Nonlinear structural control using neural networks. *Journal of engineering mechanics*, **124**(3), 319 327.
- [11] Bhardwaj, M. & Datta, T. 2006 Semiactive fuzzy control of the seismic response of building frames. *Journal of structural engineering*, **132**(5), 791 799.
- [12] Pourzeynali, S., Lavasani, H. & Modarayi, A. 2007 Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms. *Engineering Structures*, **29**(3), 346 357.
- [13] Ribakov, Y. & Dancygier, A. 2003 Optimal control of MDOF structures with controlled stiffness dampers. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **12**(5), 351 369.

Design of optimal controller of structures: Differential evolution algorithm

J. Katebi^{1*}, M. Shoaie-parchin²

1- Assistant Prof., Structural Eng. Dept., Faculty of Civil Eng., University of Tabriz

2- M.Sc. of Structural Engineering, Faculty of Civil Eng., University of Tabriz

* jkatebi@tabrizu.ac.ir

Abstract:

One of the most important goals of optimal control of structures is achieving the desired reduction in responses using minimal control forces. Regarding many researches conducted in the field of active control, several control algorithms have been presented over the past few decades. Most of these researches calculate the required control forces by optimizing a second-order performance index. There exist simplifying assumptions in formulation of these classic algorithms and constraints in mathematical optimization techniques that have been used in optimizing the performance index. For example, because of unknown nature of earthquakes, the LQR classic controller cannot consider the external forces -as earthquake excitation- in calculation of control signal. This may make difficulties in finding the optimal solution for optimization problem. Metaheuristic optimization methods, such as differential evolution, are modern algorithms and because of their special capabilities in finding global optima are powerful tools that can be used in solving complex problems. Despite of many advantages, these methods has not been used extensively for solving civil engineering problems, especially in the field of active control of structures. In this paper active control of structures is considered as an optimization problem and a controller is proposed. The controller uses the differential evolution metaheuristic algorithm for finding gain matrix elements of active control problem. The gain matrix elements are globally searched by differential evolution algorithm to minimize the LQR performance index. The proposed method is repetitive and does not need to solve the Riccati differential equation. Therefore, it is possible to consider the effect of external excitation in finding the gain matrix and calculation of control signal. The controller is applied on sample 2DOF and 10DOF structures. Responses of these structures under several excitations from the historical earthquake records are obtained by MATLAB programming. In addition to the performance index, the maximum control force, maximum displacement and 9 benchmark indexes -previously measured in controlled structures- are calculated in this study. These indexes represent the reduction of controlled maximum and average responses of structure in comparison with uncontrolled responses. In order to evaluate the effectiveness of the proposed controller, these 9 performance indexes are calculated for 2DOF and 10DOF examples against 7 historical earthquakes and are compared for proposed and LQR controller. The simulation results indicate that the proposed method is effective in keeping the controlled responses of structures in desired range. This is also efficient in reducing the vibrations of structures with lower need to control the amount of energy in comparison with LQR algorithm. Because of the great capabilities of DE algorithm in searching large spaces and due to the iterative nature of controller, it considers the effects of external forces in control process. Numerical simulation shows that performance of the presented control algorithm is better than the LQR controller in finding the optimal displacements and control forces. Therefore, metaheuristic algorithms such as differential evolution can be used in active control of structures to achieve more efficient results in comparison with classic controllers.

Keywords: Active Control, Metaheuristic, Differential Evolution, Optimization.