

کنترل بهینه‌ی ارتعاشات سازه‌ها با استفاده از تبدیل موجک و الگوریتم رقابت استعماری

جواد کانی* (استادیار)

مونا شعاعی برچین (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۶ (درداشت شف)

محاسبه‌ی نیروهای بهینه‌ی کنترل با هدف برقراری تعادل بین کاهش پاسخ و انرژی کنترلی از اصلی‌ترین اهداف روش‌های کنترل فعال سازه‌هاست. الگوریتم‌های سنتی بدون در نظر گرفتن اثرات تحریکات خارجی، نیروهای کنترلی را تعیین می‌کنند که عملاً دست‌یابی به پاسخ‌های بهینه غیرممکن می‌شود. روش‌های مدرن نظیر روش‌های فراکاوشی تاکنون به صورت منسجم در کنترل فعال سازه‌ها استفاده نشده‌اند. در پژوهش حاضر، رویکردی بهینه جهت کنترل فعال سازه‌ها پیشنهاد شده است که در آن ابتدا سیگنال زلزله به سطوح فرکانسی مختلف تجزیه و سپس در هر بازه، عناصر ماتریس بهره با هدف کمینه ساختن شاخص عملکرد توسط روش رقابت استعماری جستجو شده است. روند تکراری و عدم نیاز به حل معادله‌ی ریکاتی سبب در نظر گرفتن اثرات تحریک خارجی می‌شود. جهت بررسی کارایی کنترل، ارتعاشات چند سازه تحت تحریک زلزله‌ی مصنوعی توسط کنترلر پیشنهادی و تنظیم کننده‌ی خطی مرتبه‌ی دوم کنترل و مقایسه شده است. شبیه‌سازی‌های عددی بیانگر مؤثر بودن کنترلر مذکور در ارائه‌ی مقادیر بهینه‌تر پاسخ‌ها و نیروهای کنترلی بوده است.

واژگان کلیدی: کنترل بهینه، الگوریتم رقابت استعماری، تبدیل موجک، زلزله‌ی سطح خطر یک‌نواخت، شتاب‌نگاشت مصنوعی.

jkatebi@tabrizu.ac.ir
monashoaei@ymail.com

۱. مقدمه

طی مطالعات چند دهه‌ی اخیر، در حوزه‌ی کنترل ارتعاشات سازه‌ها، روش‌های کنترلی فعال جهت بهبود رفتار دینامیکی سازه یکی از کارآمدترین راهکارها شناخته شده‌اند. در مقایسه با سیستم‌های غیرفعال که مشخصات ابزار کنترل در طول مدت بارگذاری ثابت است؛ در سیستم‌های کنترلی فعال، اعمال نیروی دینامیکی سبب بهبود و تغییر وضعیت سازه به رفتاری پویا در برابر تحریکات زلزله می‌شود.^[۱] از این رو به سازه‌های مجهز به سیستم‌های فعال، سازه‌های هوشمند اطلاق می‌شود. انتخاب الگوریتم مناسب برای محاسبه‌ی نیروهای کنترلی به عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر سیستم کنترلی و از اصلی‌ترین بخش‌های طراحی یک سیستم کنترل فعال است و یک الگوریتم کنترل مؤثر نقش به‌سزایی در نیل به اهداف کنترل به‌ویژه برقراری تعادل بین مقدار انرژی مصرفی و میزان بهبود پاسخ سیستم دارد. از جمله‌ی این الگوریتم‌ها می‌توان به تنظیم کننده‌ی خطی مرتبه‌ی دوم^۱، کنترل مد لغزشی (SMC)^۲، تخصیص قطب^۳، کنترل پیش‌بین (MPC)^۴، کنترل ضربه‌یی و روش‌های کنترل مقاوم H_∞ و H_2 اشاره کرد،^[۱] که یکی از متداول‌ترین روش‌های محاسبه‌ی نیروهای کنترل در کنترل فعال سازه‌ها، تنظیم کننده‌ی خطی مرتبه‌ی دوم LQR است.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۹/۴، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۲/۴، پذیرش ۱۳۹۴/۱۲/۲۲.

ملاحظات اقتصادی و محدودیت ظرفیت ابزارهای اعمال نیرو سبب محدودیت در انرژی کنترلی می‌شود و ملاحظات ایمنی، محدودیت حالات و پاسخ‌های سیستم را باعث می‌شود. در کنترل بهینه با تعریف یک شاخص عملکرد مرتبه‌ی دوم و بهینه‌سازی آن، امکان برقراری تعادل بین هزینه‌ی کنترل و کارایی سیستم میسر می‌شود. در روش کلاسیک LQR، موازنه‌ی ذکر شده بدون ملاحظه‌ی اثر تحریکات زلزله در بهینه‌سازی شاخص عملکرد و محاسبه‌ی نیروهای کنترل انجام می‌شود.^[۲] همچنین به دلیل محدودیت روش‌های بهینه‌سازی به‌کارگرفته شده در کمینه ساختن شاخص عملکرد، ساده‌سازی‌هایی در فرمول‌بندی این روش اعمال می‌شود که عملاً دست‌یابی به پاسخ‌های بهینه دور از دسترس می‌شود. با توجه به توانمندی روش‌های بهینه‌سازی جمعیت‌محور^۵ نظیر الگوریتم‌های فراکاوشی^۶ در مواجهه با مسائل پیچیده‌ی بهینه‌سازی، نیاز به اعمال روش‌های مذکور و مطالعه‌ی کارایی آن‌ها در زمینه‌ی کنترل فعال سازه‌ها محسوس است. مطالعاتی که تاکنون در زمینه‌ی بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراکاوشی در کنترل سازه‌ها انجام شده است، بیشتر در زمینه‌ی بهینه‌سازی مشخصات میراگرهای غیرفعال،^[۳] تعداد و مکان بهینه‌ی محرک‌های سیستم کنترل فعال،^[۷] تنظیم و انتخاب ماتریس‌های وزنی،^[۸-۱۱] مقادیر بهینه‌ی نیروی کنترل و قیود دیگر طراحی نظیر تغییرمکان، شتاب و...^[۱۲،۱۱] بوده و بهینه‌سازی نیروی کنترل در سیستم‌های فعال به‌دردت در پژوهش‌ها بررسی و مطالعه شده است. در سال ۲۰۰۷ برای طراحی و بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرم فعال

مورد تولید رکورد زلزله‌ی مصنوعی به صورت مختصر و فرمول‌بندی روش پیشنهادی در بخش ۶ بیان شده است. سازه‌های نمونه در بخش ۷ تحت اثر شتاب‌نگاشت تولید شده قرار گرفته و پاسخ‌های ارتعاشی آن‌ها با کنترلر بهینه، کنترل و نتایج شبیه‌سازی‌ها در بخش مذکور ارائه شده است. سپس نوشتار حاضر با بیان نتیجه‌گیری در بخش ۸ پایان یافته است.

۲. استراتژی کنترل فعال سازه‌ها

توانایی روش‌های کنترل فعال برای بهبود عملکرد سیستم‌های کنترلی غیرفعال در بیش از سه دهه‌ی گذشته مطرح و به آن توجه شده است. معادله‌ی دیفرانسیل حاکم بر ارتعاش سازه‌ی مجهز به سیستم کنترل فعال به صورت رابطه‌ی ۱ نوشته می‌شود: [۲۰]

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

که در آن، M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه، \dot{X} ، \ddot{X} و X به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و تغییر مکان، $\ddot{x}_g(t)$ بردار ضرایب شتاب حرکت زمین، $U(t)$ بردار نیروهای کنترل، H بردار محل اعمال نیروهای کنترل و Γ بردار موقعیت نیروهای خارجی وارد بر سیستم (نیروهای زلزله) هستند. معادلات دینامیکی سازه با تبدیل $Z = [X, \dot{X}]^T$ در فضای حالت نوشته می‌شود (رابطه‌ی ۲):

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

که در آن، $A = \begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$ ، $B = \begin{bmatrix} O \\ M^{-1}H \end{bmatrix}_{2n \times n}$ و $E = \begin{bmatrix} O \\ -M^{-1}\Gamma \end{bmatrix}_{2n \times n}$ ماتریس تأثیر کنترل و ماتریس سیستم هستند. $H = \{1\}_{n \times 1}$ و $\Gamma = \{1\}_{n \times 1}$ هستند.

با انتقال معادلات به فضای حالت، معادله‌ی دیفرانسیل مرتبه‌ی دوم ارتعاش سازه به معادله‌ی دیفرانسیل مرتبه‌ی اول تبدیل می‌شود، اما تعداد مجهولات مسئله دو برابر می‌شود. برای حل معادلات فضای حالت مذکور نیاز به معادلات اضافی است که قانون کنترل پس‌خور نامیده و به صورت رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود:

$$\{U(t)\}_{n \times 1} = -[G]_{n \times 2n} \{Z(t)\}_{2n \times 1} \quad (3)$$

که در آن، G ماتریس بهره نام دارد. در روش LQR با تعریف شاخص عملکرد مطابق رابطه‌ی ۴ و بهینه‌سازی آن، ماتریس بهره محاسبه می‌شود و طبق رابطه‌ی ۵ برای تعیین نیروهای کنترل به‌کار می‌رود.

$$J = \int_t^{t_f} (Z^T Q Z + U^T R U) dt \quad (4)$$

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

که در معادله‌ی ۴، Q و R به ترتیب ماتریس‌های وزنی مربوط به پاسخ‌ها و نیروهای کنترلی هستند. Q ماتریس وزنی مربعی مثبت نیمه‌معین ($\det(Q) \geq 0$) با بعد $2n$ (تعداد حالات سیستم) و R ماتریس وزنی مربعی مثبت معین ($\det(R) > 0$) با بعد r است که r تعداد محرک‌هاست. در کاربردهای عملی، ماتریس‌های R و Q

(ATMD)^۲، از منطق فازی و الگوریتم ژنتیک بهره گرفته شده است. [۱۳] در پژوهش دیگری (۲۰۰۵)، استفاده از الگوریتم کنترلی ترکیب شده با موجک برای یافتن پارامترهای سیستم ترکیبی از میراگر غیرفعال و نیمه‌فعال جهت کاهش پاسخ سازه تحت تحریک زمین‌لرزه‌های مختلف بررسی شده است. [۱۴] همچنین در سال ۲۰۱۲، برای طراحی بهینه‌ی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده^۸ در قاب‌های غیرخطی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. [۵] در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۵، الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی جهت بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده اعمال شده است. [۶] در برخی از مطالعات با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراکاووشی، توابع هدف و الگوریتم‌های کنترل مختلف اقدام به بررسی توزیع بهینه و تعداد بهینه‌ی محرک‌ها شده است. [۷] همچنین در پژوهش دیگری که در سال ۲۰۱۲ انجام شده است، الگوریتم کنترل فعال بهینه‌ی برای کنترل سازه‌های غیرخطی براساس روش انتگرال‌گیری غیرخطی نیومارک و الگوریتم ژنتیک توزیع شده ارائه شده است که در آن ماتریس وزنی Q به کمک الگوریتم ژنتیک توزیع یافته^۹ تعیین شده است. [۱۱] در پژوهش دیگری نیز از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب وزن‌ها در الگوریتم LQR استفاده شده است. [۸] در سال ۲۰۱۱ نیز یک کنترلر بهینه برای سیستم فرود هواپیما طراحی شده است که در آن ماتریس‌های وزنی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)^{۱۰} به دست می‌آیند. [۹] همچنین الگوریتمی برای یافتن نیروی کنترل بهینه‌ی میراگر جرمی فعال در سال ۲۰۱۳ ارائه شده است. [۱۵] که از سه روش تبدیل موجک گسسته (DWT)^{۱۱}، بهینه‌سازی حرکت جمعی ذرات، و کنترلر LQR استفاده شده است. الگوریتم مذکور بر روی سازه‌ی ۱۰ طبقه تحت تحریک چند زلزله‌ی تاریخی نزدیک گسل اعمال شده و در مقایسه با روش LQR، پاسخ‌های بهینه‌تری به دست آمده است. در سال ۱۹۹۶، یک روش کنترل بهینه با ترکیب هوش مصنوعی، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم‌های سنتی کنترل پیشنهاد شده است. [۱۶] الگوریتم کنترل نوینی نیز با ترکیب روش کنترل کلاسیک LQR و الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی الگو^{۱۲} در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۳، ارائه شده است که پس از تجزیه‌ی زلزله‌ی سطح خطر یک‌نواخت مصنوعی توسط تبدیل موجک، عناصر ماتریس بهره‌ی کنترل در هر باند فرکانسی توسط روش جستجوی الگو بررسی شده‌اند. همچنین استفاده از الگوریتم رقابت استعماری با هدف بهینه‌سازی نیروهای کنترل برای یافتن عناصر ماتریس بهره‌ی کنترل در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۱۴، [۱۱] استفاده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری تاکنون در زمینه‌های مختلف مهندسی عمران از جمله در طراحی بهینه‌ی سازه‌های خرابایی، [۱۷] عیب‌یابی در سازه‌ها، [۱۸] بهینه‌یابی هزینه‌ی طراحی دیوارهای نگهدارنده‌ی طریه‌ی، [۱۹] و ... استفاده شده است، اما در زمینه‌ی کنترل سازه‌ها به‌ویژه کنترل فعال سازه‌ها تاکنون از قابلیت‌های این روش توانمند استفاده نشده است.

هدف از مطالعه‌ی حاضر، کنترل بهینه‌ی ارتعاشات سازه با استفاده از تبدیل موجک و الگوریتم رقابت استعماری است که به دلیل روند تکراری و عدم نیاز به حل معادله‌ی ریکاتی برخلاف روش LQR، قادر به لحاظ کردن اثر تحریک زلزله در محاسبات مربوط به نیروهای کنترلی است. بدین منظور ابتدا سیگنال زلزله به سطوح فرکانسی مختلف تجزیه و سپس در هر بازه، عناصر ماتریس بهره با هدف کمینه ساختن شاخص عملکرد توسط روش رقابت استعماری جستجو شده‌اند. روند تکراری و عدم نیاز به حل معادله‌ی ریکاتی سبب در نظر گرفتن اثرات تحریک خارجی می‌شود. روند ادامه‌ی نوشتار حاضر به این صورت است: ابتدا معادلات دینامیکی حرکت سازه در فضای حالت و فرمول‌بندی روش LQR در بخش ۲ و تجزیه‌ی سیگنال توسط تبدیل موجک گسسته در بخش ۳ ارائه شده است. بخش ۴، شامل معرفی الگوریتم رقابت استعماری و اپراتورهای آن است. در بخش ۵، اطلاعاتی در

فرضیات ساده کننده در فرمول بندی این الگوریتم های کنترل می شوند و در نتیجه دست یابی به پاسخ های بهینه دور از دسترس می شود. همین مسائل موجب گرایش به استفاده از روش های بهینه سازی جمعیت محور مبتنی بر جست و جوی تصادفی نظیر روش های فراکوشی در حل مسائل کنترل بهینه سازی شده است. یکی از مهم ترین ویژگی های روش های نوین ذکر شده، عدم نیاز به اطلاعات در مورد گرادیان تابع هدف و استفاده از اطلاعات به دست آمده در روند جستجو است. بهره گیری از اصول و مبانی ساده علم ریاضیات و در نتیجه، هزینه محاسباتی کمتر، بهینه سازی در فضای گسسته، و پیوسته و ... سبب استفاده از الگوریتم های مذکور به عنوان ابزاری توانمند در بهینه سازی توابع بسیار پیچیده و با متغیرهای طراحی بالا شده است. الگوریتم رقابت استعماری در سال ۲۰۰۷^[۱۱] ارائه شده و الهام گرفته از پدیده استعمار است. این الگوریتم از طریق شبیه سازی فرایند اجتماعی - سیاسی استعمار اقدام به حل مسائل بهینه سازی می کند. در این روش جمعیت اولیه از پاسخ های محتمل، «کشور» نامیده می شوند. کشورهایی با بهترین موقعیت، استعمارگر نام می گیرند و دیگر کشورها را به عنوان مستعمره خود در اختیار می گیرند. طی تکرارهای الگوریتم (دهه ها)، این اپراتورها جهت دست یابی به پاسخ های بهینه اعمال می شود:

۱. سیاست جذب^{۱۵}: در این مرحله مستعمرات از جهت های مختلف به سمت استعمارگر مرتبط حرکت می کنند. این حرکت با استفاده از رابطه ۱۱ مدل سازی می شود:

$$x' = x + \beta(t - x), \quad 0 \leq \beta \leq 2 \quad (11)$$

وجود ضریب $\beta \geq 1$ باعث می شود تا کشور مستعمره در حین حرکت به سمت کشور استعمارگر، از جهت های مختلف به آن نزدیک شود. با اعمال اپراتور مذکور، مستعمره ی مربوط از موقعیت خود در مکان x به موقعیت جدید x' انتقال می یابد. t موقعیت کشور استعمارگر است.

۲. اپراتور انقلاب^{۱۶}: پس از فرایند جذب مستعمرات توسط کشور استعمارگر، اپراتور انقلاب اعمال می شود. در الگوریتم رقابت استعماری، انقلاب با جابه جایی تصادفی مستعمرات به موقعیت های جدید تصادفی مدل می شود. عملکرد این فرایند مشابه عملکرد جهش در الگوریتم ژنتیک است و سبب می شود تا روند جستجو از دام بهینه های محلی نجات یابد. در نتیجه ی این حرکت مستعمرات، اگر موقعیت کشور مستعمره بهتر از کشور استعمارگر خود شود، موقعیت کشور مستعمره با استعمارگر جابه جا خواهد شد.

۳. رقابت استعماری^{۱۷}: در این مرحله، رقابتی بین کشورهای استعمارگر برای تصاحب یک مستعمره از ضعیف ترین استعمارگر شکل می گیرد و استعمارگر فاقد مستعمره از جریان رقابت استعماری حذف می شود. روند اعمال اپراتورهای مذکور تا حصول شرط خاتمه ی الگوریتم ادامه می یابد.

۵. تولید رکورد زلزله مصنوعی

نیاز به استفاده از شتاب نگاشت های منطبق بر خصوصیات لرزه خیزی منطقه در طراحی کنترلر و از طرفی ناشناخته بودن ویژگی های زلزله ی رخ داده در یک سایت، سبب گرایش به تولید و استفاده از رکوردهای مصنوعی زلزله شده است. در نوشتاری در سال ۱۲، ۲۰^[۱۲] مجموعه یی از رکوردهای پروژه ی فولادی SAC برای به دست آوردن پارامترهای تولید شتاب نگاشت سطح خطر یک نواخت استفاده و شتاب نگاشت هایی با سطح خطر ۱٪ در ۵۰ سال و ۲٪ در ۵۰ سال برای مناطق جغرافیایی مشخص

قطری در نظر گرفته می شوند. به طور متداول انتخاب ماتریس های مذکور به کمک تجربه ی طراح و با روند سعی و خطا انجام می شود. بازه ی زمانی اعمال نیروی زلزله و P ماتریس مربعی مثبت معین و پاسخ معادله ی دیفرانسیل ریکاتی (RDE)^{۱۳} (رابطه ی ۶) است که ماتریس ریکاتی نامیده می شود.

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = -\dot{P} \quad (6)$$

۳. تبدیل موجک

پارامترهای سیگنال های زلزله هم در دامنه و هم در فرکانس، نا ایستا هستند و بنابراین امکان اینکه فرکانس طبیعی سازه بین فرکانس های تشکیل دهنده ی زلزله وجود داشته باشد، زیاد است. جهت مطالعه ی محتوای فرکانسی زلزله به تحلیل زمان - فرکانس نیاز است که یکی از پرکاربردترین ابزارهای تحلیل فرکانسی امواج، تبدیل موجک است. تبدیل موجک پیوسته ی^{۱۴} تابع $x(t)$ از رابطه ی ۷ به دست می آید:

$$wt(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) dt \quad (7)$$

که در آن، ψ و ψ^* به ترتیب تابع پایه ی موجک و مزدوج مختلط آن و پارامترهای s و τ به ترتیب پارامترهای مقیاس و انتقال نام دارند که از طریق مقیاس و انتقال تابع پایه یی به نام «موجک مادر» موجک ها را تشکیل می دهند.

استفاده از تبدیل موجک در فرم پیوسته، منجر به تولید تعداد نامتناهی از موجک ها می شود که نمی توان آن را به راحتی حساب کرد و مقدار انتگرال نیز در بسیاری از مسائل عملی، فرم تحلیلی ندارد و باید به صورت عددی محاسبه شود. برای حل مشکلات عنوان شده، تبدیل موجک گسسته معرفی شده است. نسخه ی گسسته ی تبدیل موجک از گسسته سازی پارامترهای مقیاس و انتقال موجک پیوسته حاصل می شود. موجک های گسسته به صورت پیوسته، مقیاس پذیر و انتقال پذیر نیستند و این قابلیت را فقط در فواصلی گسسته دارند. روند گسسته سازی با روابط ۸ و ۹ انجام می گیرد (j و k اعداد صحیح هستند).

$$s = 2^{-j}, \quad \tau = 2^{-j} k \quad (8)$$

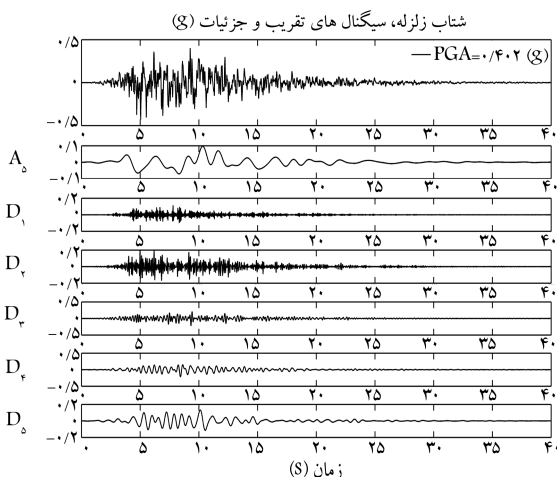
$$wt_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (9)$$

با اعمال تبدیل موجک، سیگنال به دو بخش اصلی تقسیم می شود. خروجی عبوری از فیلتر پایین گذر سیگنال تقریب $A(t)$ و خروجی عبوری از فیلتر بالا گذر سیگنال جزئیات $D(t)$ نام دارند. عبور سیگنال از فیلترهای بالا گذر و پایین گذر تا سطح مورد نظر n ادامه می یابد. در نهایت سیگنال تجزیه شده به سطوح تقریب و جزئیات می تواند با استفاده از رابطه ی ۱۰ بازسازی شود.

$$S(t) = A_n(t) + \sum_{j=1}^n D_j(t) \quad (10)$$

۴. الگوریتم بهینه سازی رقابت استعماری

در کنترل بهینه سازی سازه ها، وجود قید برای پاسخ سازه از یک سو و محدودیت نیروی کنترل مورد نیاز از سوی دیگر، مسئله ی کنترل را به یک مسئله ی بهینه سازی مبدل می کند. روش های کلاسیک بهینه سازی نظیر روش لاگرانژ که در الگوریتم های کلاسیک کنترل سازه ها به کار می رود، به دلیل محدودیت در عملکردشان سبب اعمال



شکل ۲. شتاب‌نگاشت زلزله‌ی مصنوعی با سطح خطر یک‌نواخت ۱٪ در ۵۰ سال (PGA=0.402g) و تجزیه‌ی آن به ۵ سطح با استفاده از موجک ۱۰ db.

فرکانسی مختلف تجزیه شده و با بهینه کردن شاخص عملکرد J ، در هر محدوده‌ی فرکانسی ماتریس بهره‌ی کنترل متفاوتی حاصل می‌شود. سپس نیروهای کنترل از رابطه‌ی ۱۵ به دست می‌آیند:

$$U(t) = U_J(t) + \sum_{j \leq J} U_j(t) \quad (15)$$

در شکل ۲، A_0 سیگنال تقریب سطح ۵ و D_j ها، سیگنال‌های جزئیات سطح J ام هستند. رابطه‌ی ۱۲، می‌تواند برای بازسازی سیگنال استفاده شود.

۷. شبیه‌سازی عددی و نتایج

در بخش حاضر برای بررسی عملکرد و قابلیت‌های روش کنترل پیشنهادی که در بخش ۶ ارائه شده است، چند نمونه سازه‌ی مجهز به کنترل فعال، مدل‌سازی شده است. پاسخ‌های کنترل شده و کنترل نشده‌ی سازه تحت تأثیر شتاب‌نگاشت مصنوعی با سطح خطر یک‌نواخت، محاسبه و نتایج به دست آمده با روش LQR مقایسه شده است. جهت بررسی عملکرد روش حاضر، پاسخ تغییر مکان، شاخص عملکرد J و مقادیر نیروهای کنترل ملاک مقایسه هستند.

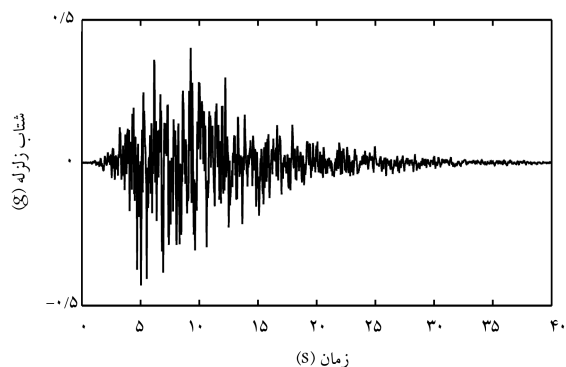
مدل‌سازی سازه‌ها با استفاده از این فرضیات انجام شده است:

- سازه‌ها قاب‌هایی برشی با رفتار خطی هستند و سیستم کنترل نیز خطی فرض شده است.
- از اثر تأخیر زمانی چشم‌پوشی شده است.
- اثر تحریکات زلزله در معادلات در نظر گرفته شده است.

۱.۷. سازه‌ی یک درجه آزادی (SDOF)

به عنوان نخستین مثال، ارتعاشات سازه‌ی یک درجه آزادی با مشخصات دینامیکی ذکر شده در جدول ۱ با کنترلر پیشنهادی کنترل شده است. این مشخصات به استثناء ارتفاع طبقه، از نوشتاری در سال ۲۰۱۳، برداشت شده‌اند.^[۱۲]

نسبت میرایی برابر $\zeta = 1\%$ در نظر گرفته شده است. در مثال مذکور، بیشینه‌ی نیروی کنترل مجاز و بیشینه‌ی دررفت مجاز به ترتیب برابر 53°kN و 35°mm هستند



شکل ۱. نمونه‌ی از شتاب‌نگاشت تولید شده با سطح خطر یک‌نواخت ۱٪ در ۵۰ سال.

تولید شده است. در نوشتار حاضر با استفاده از روش حوزه‌ی زمان به کار گرفته شده در نوشتار مذکور و پارامترهای به دست آمده در آن، اقدام به تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی با سطح خطر ۱٪ در ۵۰ سال برای نواحی دور از گسل شده است که جهت اختصار از ارائه‌ی جزئیات و جدول‌های مربوطه صرف‌نظر شده است. با کدنویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB، زلزله‌ی سطح خطر یک‌نواخت تولید شده است، که شکل ۱ نمونه‌ی شتاب‌نگاشت تولید شده جهت استفاده در شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد.

۶. فرمول‌بندی روش پیشنهادی

حل عددی و عقب‌گرد معادلات ماتریسی در مسائل کنترل بهینه، نیاز به اطلاع قبلی از تحریک زلزله را الزامی می‌کند. این مسئله برای سازه‌ها تحت تحریک‌های نامشخص ممکن نیست و رویکردهای حاضر و متداول نظیر LQR از طریق نادیده گرفتن عبارت تحریک خارجی، مسائل کنترل بهینه را برای به دست آوردن بهره‌ی کنترل حل می‌کند. در پژوهش حاضر، شکل تغییر یافته‌ی الگوریتم LQR رایج پیشنهاد می‌شود. مسئله‌ی طراحی کنترلر در پژوهش حاضر، انتخاب و تعیین بهینه‌ی المان‌های ماتریس بهره‌ی پسخور با استفاده از روش بهینه‌سازی رقابت استعماری است. در این فرمول‌بندی از تبدیل موجک گسسته‌ی سیگنال زلزله استفاده می‌شود. اگر سیگنال زلزله توسط تبدیل موجک تا J سطح تجزیه شود، رابطه‌ی ۱۲ را خواهیم داشت:

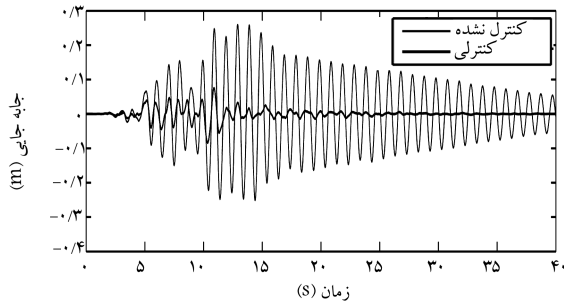
$$\ddot{x}_g = A_J(t) + \sum_{j \leq J} D_j(t) \quad (12)$$

که در آن، A_J سیگنال تقریب سطح J و D_j سیگنال جزئیات سطح J ام است. با اتخاذ این رویکرد، فرمول محاسبه‌ی شاخص عملکرد روش LQR به صورت روابط ۱۳ و ۱۴ تغییر می‌یابد:

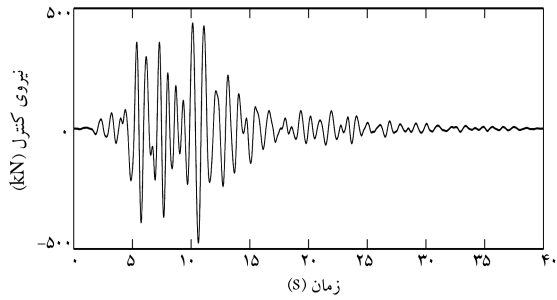
$$J_j = \int_0^{t_f} (Z_j(t)^T Q_j Z_j(t) + U_j(t)^T R U_j(t)) dt \quad (13)$$

$$J = \int_0^{t_f} (Z_J(t)^T Q_J Z_J(t) + U_J(t)^T R U_J(t)) dt + \sum_{j \leq J} \int_0^{t_f} (Z_j(t)^T Q_j Z_j(t) + U_j(t)^T R U_j(t)) dt \quad (14)$$

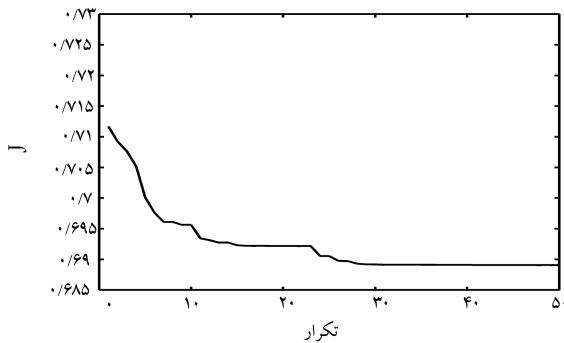
جهت تجزیه‌ی سیگنال زلزله به کمک تبدیل گسسته‌ی موجک از موجک مادر $db10$ در $J = 5$ مرحله استفاده می‌شود (شکل ۲). سیگنال زلزله در باندهای



شکل ۳. پاسخ تغییر مکان سازه‌ی SDOF تحت تحریک زلزله با سطح خطر ۱٪ در ۵۰ سال.



شکل ۴. نیروی کنترل محاسبه شده برای سازه‌ی SDOF تحت تحریک زلزله با سطح خطر ۱٪ در ۵۰ سال.



شکل ۵. نمودار هم‌گرایی شاخص عملکرد طی تکرارهای الگوریتم رقابت استعماری برای سازه‌ی SDOF تحت تحریک زلزله با سطح خطر ۱٪ در ۵۰ سال.

جدول ۴. مشخصات دینامیکی سازه‌ی دو درجه آزادی (۲DOF) تحت تحریک زلزله‌ی مصنوعی با سطح خطر یکنواخت.

طبقه	جرم (kg)	سختی (kN/m)	ارتفاع طبقه (m)
۱-۲	۵۰۰۰۰	۸۰۰۰	۳٫۰۰

پارامترهای J ، x_{max} ، u_{max} و d_{max} به ترتیب شاخص عملکرد، بیشینه‌ی پاسخ تغییر مکان، بیشینه‌ی نیروی کنترل و بیشینه‌ی دررفت سازه هستند.

۲.۷. سازه‌ی ۲ درجه آزادی (۲DOF)

مشخصات دینامیکی سازه در جدول ۴ ارائه شده است. این مشخصات به استثناء ارتفاع طبقات از مرجع [۱۲] برداشت شده‌اند. نسبت میرایی برای تمامی مودها برابر ۵٪ $\zeta =$ در نظر گرفته شده است. در مثال حاضر، بیشینه‌ی نیروی کنترل مجاز و

جدول ۱. مشخصات دینامیکی سازه‌ی یک درجه آزادی (SDOF) تحت تحریک زلزله‌ی مصنوعی با سطح خطر یکنواخت.

طبقه	جرم (kg)	سختی (kN/m)	ارتفاع طبقه (m)
۱	۵۰۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۳٫۰۰

جدول ۲. پارامترهای مربوط به روش بهینه‌سازی رقابت استعماری برای سازه‌ی SDOF تحت تحریک زلزله‌ی مصنوعی با سطح خطر ۱٪ در ۵۰ سال.

$[-1.5 \times 10^4, 1.5 \times 10^6]$	محدوده‌ی متغیرهای ماتریس بهره‌ی کنترل
۵۰ Iteration	تعداد تکرار بیشینه (تعداد دهه‌ها)
۳۰ N_{var}	تعداد اعضاء جمعیت اولیه (تعداد کشورها)
۳ N_{imp}	تعداد کشورهای استعمارگر
۲ β	ضریب جذب
۰٫۵ γ	ضریب زاویه‌ی جذب
۰٫۳ θ	نرخ انقلاب
۰٫۲ ξ	درصد تأثیر قدرت مستعمرات در قدرت امپراطوری

جدول ۳. نتایج حاصل از اعمال کنترل‌کننده‌ی LQR، کنترلر مرجع [۱۲]، کنترلر پیشنهادی و میانگین ۱۰ بار اجرای روش پیشنهادی برای سازه‌ی SDOF تحت تحریک زلزله با سطح خطر ۱٪ در ۵۰ سال.

الگوریتم کنترل	J	$x_{max}(m)$	$u_{max}(kN)$	d_{max}
LQR	۰٫۸۸۷۵	۰٫۰۹۰۸	۵۲۶٫۷۲۵۶	۰٫۰۳۰۳
الگوریتم مرجع [۱۲]	۰٫۷۲۵۰	۰٫۰۸۰۹	۴۶۹٫۱۴۰۰	۰٫۰۱۸۰
الگوریتم پیشنهادی	۰٫۶۸۹۰	۰٫۰۸۴۴	۴۷۴٫۴۳۲۰	۰٫۰۲۸۱
میانگین ۱۰ بار اجرا	۰٫۶۸۹۱	۰٫۰۸۴۵	۴۷۳٫۷۱۷۵	۰٫۰۲۸۲

و ماتریس‌های وزنی Q و R برای این قاب به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$Q_j = \text{diag}([0, 1, 1])$$

$$R_j = 10^{-12}$$

این ماتریس‌ها برای هر دو روش LQR و روش پیشنهادی یکسان فرض شده‌اند. جدول ۲، میانگین پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری است که در مثال مذکور استفاده شده است. محدوده‌ی مناسب برای متغیرهای مسئله براساس سعی و خطا به دست آمده است. با مدل‌سازی سازه در نرم‌افزار MATLAB، پاسخ سازه به اِزاء شرایط اولیه‌ی صفر تحت اثر شتاب‌نگاشت موردنظر به دست آمده است. شکل‌های ۳ و ۴، پاسخ سازه در حالت کنترل نشده و اعمال روش پیشنهادی و نیروی کنترلی موردنیاز را نشان می‌دهند.

شکل ۵، روند بهینه‌یابی شاخص عملکرد را طی تکرارهای الگوریتم رقابت استعماری نمایش می‌دهد. نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی و روش LQR برای سازه‌ی SDOF، در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین نتایج حاصل از اعمال کنترلر پیشنهادی در مرجع [۱۲] جهت مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی در جدول مذکور ارائه شده است. به دلیل ماهیت تصادفی روش بهینه‌سازی مورد استفاده در طراحی کنترلر، میانگین ۱۰ بار اجرای الگوریتم نیز محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است.

شکل ۸، روند بهینه‌یابی شاخص عملکرد را طی تکرارهای الگوریتم رقابت استعماری نشان می‌دهد. نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی و روش LQR برای مثال ذکر شده، در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج حاصل از اعمال کنترل پیشنهادی در مرجع [۱۲] نیز جهت مقایسه در جدول مذکور ارائه شده است. پارامترهای J ، x_{\max} ، u_{\max} و d_{\max} به ترتیب شاخص عملکرد، بیشینه پاسخ تغییر مکان و بیشینه نیروی کنترل در طبقه‌ی دوم و بیشینه دررفت سازه هستند.

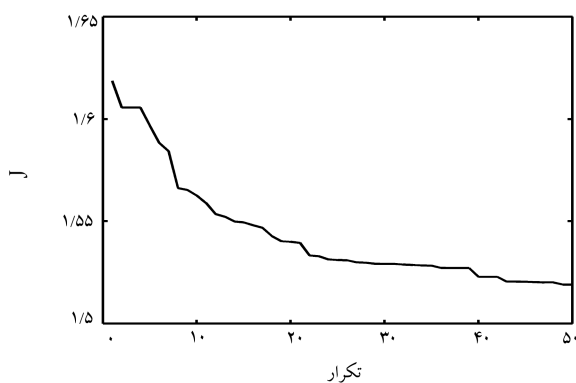
۳.۷. سازه‌ی ۱۰ درجه آزادی (۱۰DOF)

مشخصات دینامیکی سازه‌ی ۱۰ درجه آزادی در جدول ۷ ارائه شده است. نسبت میرایی برای تمامی مودها برابر $\zeta = 3\%$ در نظر گرفته شده است. بیشینه نیروی کنترل مجاز و بیشینه دررفت مجاز به ترتیب برابر 100 kN و 10 mm هستند و ماتریس‌های وزنی Q و R که برای روش LQR و کنترل پیشنهادی یکسان فرض شده‌اند، برای قاب مذکور به این صورت هستند:

$$Q_j = \text{diag}([0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, \dots,$$

$$1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10])$$

$$R_j = 10^{-10} I_{10 \times 10}$$



شکل ۸. نمودار هم‌گرایی شاخص عملکرد طی تکرارهای الگوریتم رقابت استعماری برای سازه‌ی ۲DOF تحت تحریک زلزله با سطح خطر ۱۰٪ در ۵۰ سال.

جدول ۶. نتایج حاصل از اعمال کنترل‌کننده‌ی LQR، کنترل مرجع [۱۲]، کنترل پیشنهادی و میانگین ۱۰ بار اجرای روش پیشنهادی برای سازه‌ی ۲DOF تحت تحریک زلزله با سطح خطر ۱۰٪ در ۵۰ سال.

d_{\max}	u_{\max} (kN)	x_{\max} (m)	J	الگوریتم کنترل
۰٫۰۰۹۸	۵۷٫۷۱۹۶	۰٫۰۷۸۷	۱٫۸۵۸۵	LQR
۰٫۰۱۲۸	۵۸٫۹۸۰۰	۰٫۰۷۶۸	۱٫۶۲۹۰	الگوریتم مرجع [۱۲]
۰٫۰۱۵۵	۵۲٫۶۲۴۰	۰٫۰۷۴۷	۱٫۵۰۵۰	الگوریتم پیشنهادی
۰٫۰۱۵۵	۵۴٫۸۶۱۷	۰٫۰۷۴۸	۱٫۵۰۷۲	میانگین ۱۰ بار اجرا

جدول ۷. مشخصات دینامیکی سازه‌ی ۱۰ درجه آزادی (۱۰DOF) تحت تحریک زلزله‌ی مصنوعی با سطح خطر یکنواخت.

طبقه	جرم (kg)	سختی (kN/m)	ارتفاع طبقه (m)
۱-۵	۶۰۰۰۰	۱۲۰۰۰	۳٫۰۰
۶-۱۰	۶۰۰۰۰	۸۰۰۰	۳٫۰۰

بیشینه‌ی دررفت مجاز به ترتیب برابر 60 kN و 20 mm فرض شده‌اند. ماتریس‌های وزنی Q و R برای این قاب به این صورت هستند:

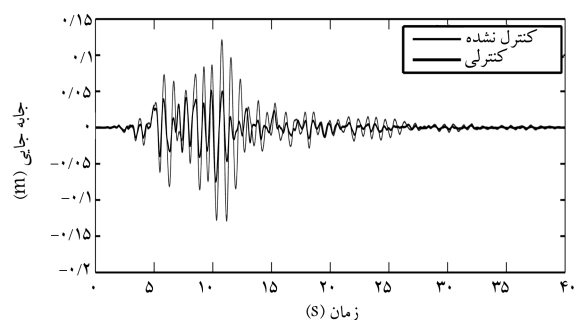
$$Q_j = \text{diag}([0.1, 0.2, 1, 2])$$

$$R_j = 10^{-10} I_{2 \times 2}$$

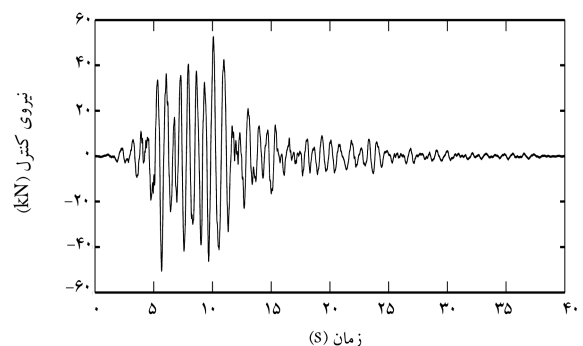
که برای روش LQR و کنترل پیشنهادی یکسان هستند. نیروهای کنترل در تمام درجات آزادی اعمال شده‌اند. در جدول ۵، پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده در مثال حاضر ارائه شده‌اند. محدوده‌ی مناسب برای متغیرهای مسئله براساس سعی و خطا به دست آمده است. با مدل‌سازی سازه در نرم‌افزار MATLAB، پاسخ‌های سازه به ازاء شرایط اولیه‌ی صفر تحت اثر شتاب‌نگاشت موردنظر به دست آمده است. شکل‌های ۶ و ۷، پاسخ سازه در حالت کنترل نشده و اعمال روش پیشنهادی و نیروی کنترلی موردنیاز را نشان می‌دهند.

جدول ۵. پارامترهای مربوط به روش بهینه‌سازی رقابت استعماری برای سازه‌ی ۲DOF تحت تحریک زلزله‌ی مصنوعی با سطح خطر ۱۰٪ در ۵۰ سال.

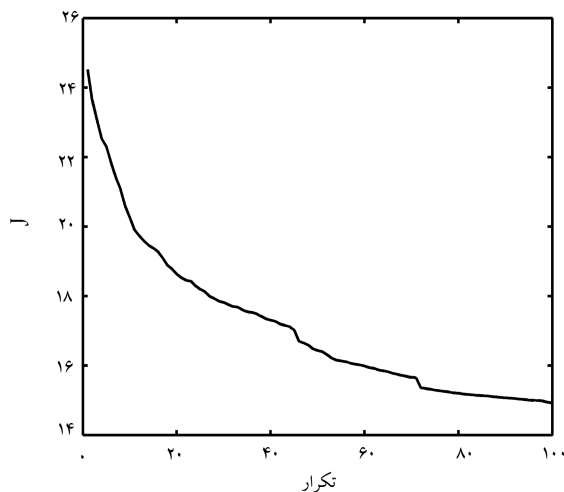
محدوده‌ی متغیرهای ماتریس بهره‌ی کنترل	تعداد تکرار بیشینه (تعداد دهه‌ها)	تعداد اعضاء جمعیت اولیه (تعداد کشورها)	تعداد کشورهای استعمارگر	ضریب جذب	ضریب زاویه‌ی جذب	نرخ انقلاب	درصد تأثیر قدرت مستعمرات در قدرت امپراطوری
$[-1/5 \times 10^3, 1/5 \times 10^5]$	۵۰	۳۰	۳	۲	۰٫۵	۰٫۳	۰٫۲
Iteration	Nvar	Nimp	β	γ	θ	ξ	



شکل ۶. پاسخ تغییر مکان طبقه‌ی دوم سازه‌ی ۲DOF تحت تحریک زلزله با سطح خطر ۱۰٪ در ۵۰ سال.



شکل ۷. نیروی کنترل محاسبه شده برای طبقه‌ی دوم سازه‌ی ۲DOF تحت تحریک زلزله با سطح خطر ۱۰٪ در ۵۰ سال.



شکل ۱۱. نمودار هم‌گرایی شاخص عملکرد طی تکرارهای الگوریتم رقابت استعماری برای سازه ۱^oDOF تحت تحریک زلزله با سطح خطر ۱۰٪ در ۵۰ سال.

جدول ۹. نتایج حاصل از اعمال کنترل‌کننده LQR، کنترل پیشنهادی و میانگین ۱۰ بار اجرای روش پیشنهادی برای سازه ۱^oDOF تحت تحریک زلزله با سطح خطر ۱۰٪ در ۵۰ سال.

الگوریتم کنترل	J	$w_{max}(m)$	$u_{max}(kN)$	d_{max}
LQR	۱۶٫۳۱۷۷	۰٫۰۸۹۹	۹۹٫۸۳۴۱	۰٫۰۰۷۹
الگوریتم پیشنهادی	۱۴٫۴۹۴۷	۰٫۰۷۵۶	۶۳٫۳۸۴۱	۰٫۰۰۶۳
میانگین ۱۰ بار اجرا	۱۴٫۸۰۹۶	۰٫۰۷۹۹	۷۴٫۹۳۴۷	۰٫۰۰۶۷

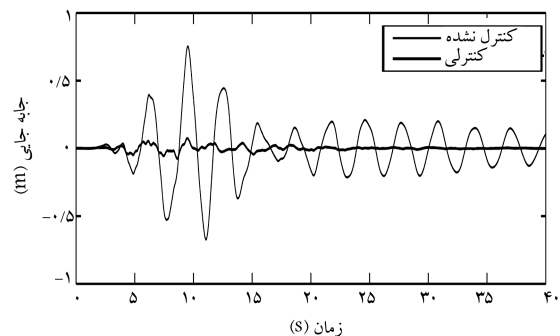
۸. نتیجه‌گیری

به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، شبیه‌سازی‌هایی بر روی سازه‌های یک درجه و چند درجه آزادی تحت تحریک زلزله مصنوعی تولید شده انجام شده است و همان‌گونه که انتظار می‌رفت، نتایج حاکی از آن است که اعمال کنترلر بهینه‌ی پیشنهادی در مقایسه با کنترل‌کننده کلاسیک LQR، موجب بهبود رفتار سیستم کنترلی شده است.

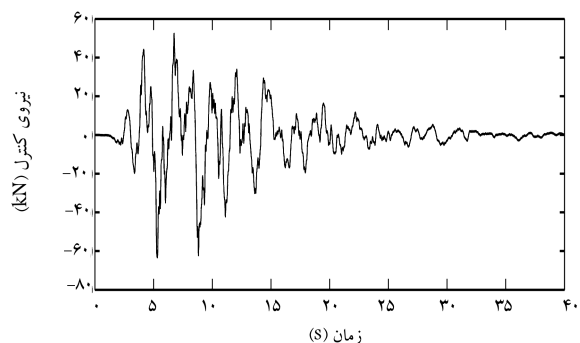
نتایج جدول‌ها و نمودارهای بخش ۷ نشان می‌دهد که بیشینه‌ی پاسخ تغییر مکان سازه یک درجه آزادی با اعمال کنترلر پیشنهادی نسبت به کنترلر LQR، ۷٪ کاهش یافته است. در کنار کاهش ۷٪ بیشینه‌ی پاسخ سازه، بیشینه‌ی نیروی کنترل موردنیاز نیز ۱۱٪ کاهش یافته است. روند کاهش پاسخ سازه و نیروی کنترل موردنیاز در مورد سازه‌های ۲ و ۱۰ درجه آزادی نیز مشاهده می‌شود. به طوری که بیشینه‌ی پاسخ تغییرمکان طبقه‌ی دوم سازه‌ی ۲ درجه آزادی با اعمال حدود ۹۰٪، انرژی کنترلی موردنیاز روش LQR تا ۵٪ کاهش یافته است. در مورد سازه‌ی ۱۰ درجه آزادی نیز کنترلر پیشنهادی با کاهش ۱۶٪ بیشینه‌ی پاسخ بام نسبت به روش LQR، از طریق اعمال ۶۴٪ نیروی کنترل بیشینه‌ی روش کلاسیک توانسته است عملکرد بهینه‌تری را نسبت به روش مذکور از خود نشان دهد. مقایسه‌ی شاخص عملکرد بهینه شده توسط کنترلر رقابت استعماری با کنترلر مبتنی بر روش بهینه‌یابی جستجوی الگو مرجع^[۱۲] نشان می‌دهد که الگوریتم رقابت استعماری نسبت به روش جستجوی الگو، عملکرد مناسب‌تری در یافتن مقدار بهینه‌ی جهانی دارد و شاخص عملکرد سازه‌ی یک درجه آزادی ۵٪ و شاخص عملکرد سازه‌ی ۲ درجه آزادی ۷٫۵٪ نسبت به مقادیر حاصل از روش جستجوی الگو کاهش از خود نشان داده‌اند.

جدول ۸. پارامترهای مربوط به روش بهینه‌سازی رقابت استعماری برای سازه ۱^oDOF تحت تحریک زلزله مصنوعی با سطح خطر ۱۰٪ در ۵۰ سال.

$[-5 \times 10^3, 5 \times 10^4]$	محدوده‌ی متغیرهای ماتریس بهره‌ی کنترلر
۱۰۰	تعداد تکرار بیشینه (تعداد دهه‌ها)
۵۰	تعداد اعضاء جمعیت اولیه (تعداد کشورها)
۵	تعداد کشورهای استعمارگر
۲	ضریب جذب
۰٫۵	ضریب زاویه‌ی جذب
۰٫۳	نرخ انقلاب
۰٫۲	درصد تأثیر قدرت مستعمرات در قدرت امپراطوری



شکل ۹. پاسخ تغییر مکان طبقه‌ی دهم سازه ۱^oDOF تحت تحریک زلزله با سطح خطر ۱۰٪ در ۵۰ سال.



شکل ۱۰. نیروی کنترل محاسبه شده برای طبقه‌ی دهم سازه ۱^oDOF تحت تحریک زلزله با سطح خطر ۱۰٪ در ۵۰ سال.

جدول ۸، بیانگر پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده در مسئله‌ی حاضر و محدوده‌ی مناسب برای متغیرهای مسئله است که براساس سعی و خطا به دست آمده‌اند. با مدل‌سازی سازه در نرم‌افزار MATLAB، پاسخ‌های سازه به ازاء شرایط اولیه‌ی صفر تحت اثر شتاب‌نگاشت موردنظر به دست آمده است. شکل‌های ۹ و ۱۰، پاسخ تغییر مکان سازه در حالت کنترل نشده و اعمال روش پیشنهادی و نیروی کنترلی موردنیاز را نشان می‌دهند. شکل ۱۱، روند بهینه‌یابی شاخص عملکرد را طی تکرارهای الگوریتم رقابت استعماری نشان می‌دهد. نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی و روش LQR در این قاب، در جدول ۹ ارائه شده است.

پارامترهای J ، w_{max} ، u_{max} و d_{max} به ترتیب شاخص عملکرد، بیشینه‌ی پاسخ تغییر مکان و بیشینه‌ی نیروی کنترل در طبقه‌ی دهم و بیشینه‌ی دررفت سازه هستند.

مورد نیاز برای سازه‌های ۱ درجه و چند درجه آزادی می‌توان نتیجه گرفت تبدیل موجک و روش فراکالوشی رقابت استعماری که به‌عنوان ابزاری کارآمد در بسیاری از شاخه‌های مهندسی مطرح شده‌اند، می‌توانند کارایی و توانایی خود را در کنترل سازه‌ها به نمایش بگذارند و به‌عنوان روشی نوین و مؤثر در کنترل فعال سازه‌ها مطرح شوند.

همچنین همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهند، با توجه به تأثیر مودهای بالاتر در پاسخ سازه‌ی ۱۰ درجه آزادی، استفاده از تجزیه‌ی فرکانسی زلزله در کنترلر پیشنهادی سبب کاهش مناسب‌تر پاسخ‌های سازه‌ی ۱۰ درجه آزادی نسبت به سازه‌های با درجه آزادی پایین‌تر شده است. با توجه به کاهش هم‌زمان بیشینه‌ی پاسخ سیستم و هم‌چنین نیروی کنترلی

پانوشتها

1. linear quadratic regulator
2. sliding mode control (SMC)
3. pole assignment
4. model predictive control (MPC)
5. population-based algorithms
6. metaheuristic algorithms
7. active tuned mass damper (ATMD)
8. tuned mass damper
9. distributed genetic algorithm
10. particle swarm optimization (PSO)
11. discrete wavelet transform (DWT)
12. pattern search
13. ricatti differential equation (RDE)
14. continuous wavelet transform
15. assimilation
16. revolution
17. imperialist competition

منابع (References)

1. Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T., Chassiakos, A., Claus, R., Masri, S., Skelton, R., Soong, T., Spencer, B. and Yao, J.T. "Structural control: Past, present, and future", *Journal of Engineering Mechanics*, **123**(9), pp. 897-971 (1997).
2. Soong, T. and Spencer Jr Reviewer, B. "Active structural control: Theory and practice", *Journal of Engineering Mechanics*, **118**(6), pp. 1282-1285 (1992).
3. Spencer Jr, B. and Nagarajaiah, S. "State of the art of structural control", *Journal of Structural Engineering*, **129**(7), pp. 845-856 (2003).
4. Basu, B. and Nagarajaiah, S. "A wavelet-based time-varying adaptive LQR algorithm for structural control", *Engineering Structures*, **30**(9), pp. 2470-2477 (2008).
5. Mohebbi, M. and Joghataie, A. "Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **21**(1), pp. 57-76 (2012).
6. Ozsariyidiz, S.S. and Bozer, A. "Finding optimal parameters of tuned mass dampers", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **24**(6), pp. 461-475 (2015).
7. Wongprasert, N. and Symans, M. "Application of a genetic algorithm for optimal damper distribution within the nonlinear seismic benchmark building", *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(4), pp. 401-406 (2004).
8. Lingbo, Z. and Jianqin, M. "An approach for selecting the weighting matrices of LQ optimal controller design based on genetic algorithms", *In TENCEN'02. Proceedings. 2002 IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering*, pp. 1331-1334 (2002).
9. Mobayen, S., Rabiei, A., Moradi, M. and Mohammady, B. "Linear quadratic optimal control system design using particle swarm optimization algorithm", *International Journal of the Physical Sciences*, **6**(30), pp. 6958-6966 (2011).
10. Joghataie, A. and Mohebbi, M. "Optimal control of nonlinear frames by Newmark and distributed genetic algorithms", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **21**(2), pp. 77-95 (2012).
11. Amini, F. and Bagheri, A. "Optimal control of structures under earthquake excitation based on the colonial competitive algorithm", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **23**(7), pp. 500-511 (2014).
12. Bagheri, A. and Amini, F. "Control of structures under uniform hazard earthquake excitation via wavelet analysis and pattern search method", *Structural Control and Health Monitoring*, **20**(5), pp. 671-685 (2013).
13. Pourzeynali, S., Lavasani, H. and Modarayi, A. "Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms", *Engineering Structures*, **29**(3), pp. 346-357 (2007).
14. Kim, H. and Adeli, H. "Hybrid control of smart structures using a novel wavelet and infrastructure engineering", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **20**(1), pp. 7-22 (2005).
15. Amini, F., Hazaveh, N.K. and Rad, A.A. "Wavelet PSO LQR algorithm for optimal structural control using active tuned mass dampers", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **28**(7), pp. 542-557 (2013).
16. Kundu, S. and Kawata, S. "Genetic algorithms for optimal feedback control design", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **9**(4), pp. 403-411 (1996).

17. Talatahari, S., Kaveh, A. and Sheikholeslami, R. "Chaotic imperialist competitive algorithm for optimum design of truss structures", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **46**(3), pp. 355-367 (2012).
18. Bagheri, A., Razeghi, H. and Amiri, G.G. "Detection and estimation of damage in structures using imperialist competitive algorithm", *Shock and Vibration*, **19**(3), pp. 405-419 (2012).
19. Pourbaba, M., Talatahari, S. and Sheikholeslami, R. "A chaotic imperialist competitive algorithm for optimum cost design of cantilever retaining walls", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **17**(5), pp. 972-979 (2013).
20. Cheng, F.Y., Jiang, H. and Lou, K., *Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control*, CRC Press, 672 p. (2008).
21. Atashpaz-Gargari, E. and Lucas, C. "Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", *In Evolutionary Computation, CEC 2007, IEEE Congress on*, pp. 4661-4667 (2007).
22. Fatemi, A., Bagheri, A., Amiri, G.G. and Ghafory-Ashtiany, M. "Generation of uniform hazard earthquake accelerograms and near-field ground motions", *Journal of Earthquake and Tsunami*, **6**(2), pp. 1-17 (2012).