

چکیده

کنترل فعال به عنوان استراتژی مؤثر بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها از طریق محاسبه و اعمال نیروی خارجی سبب تغییر تطبیقی مشخصات دینامیکی سازه هنگام وقوع زلزله می‌گردد. در روش LQR به عنوان رایج‌ترین الگوریتم کنترل، شاخص عملکرد مرتبه‌ی دومی بهینه می‌گردد تا توازن بین کاهش پاسخ و نیروی کنترل برقرار شود. در تعریف شاخص عملکرد اهمیت نسبی کاهش پاسخ و نیروی کنترل با انتخاب ماتریس‌های وزنی تنظیم می‌گردد. تاکنون روشی سیستماتیک برای تعیین این ماتریس‌ها ارائه نشده و انتخاب وزن‌ها بر اساس سعی و خطا و تجربیات طراح صورت می‌گیرد. در این پژوهش جهت تسهیل روند طراحی کنترلر، عناصر ماتریس‌های وزنی R و Q به عنوان متغیرهای طراحی روش‌های فراکاوشی در نظر گرفته شده و شاخص عملکرد مبتنی بر موجک بهینه می‌گردد. با توجه به تعدد روش‌های فراکاوشی، در این مطالعه از شش الگوریتم رقابت استعماری، تکامل تفاضلی، خفاش، کرم شب‌تاب، اجسام در حال برخورد و جستجوی هارمونی در طراحی کنترلر استفاده شده و عملکرد این روش‌ها مقایسه می‌شود. نتایج اعمال کنترلر بر سازه‌ی سه درجه آزادی تحت زلزله‌های مصنوعی بیانگر نقش مؤثر روش‌های فراکاوشی در کاهش پاسخ‌ها و نیروهای کنترلی نسبت به روش LQR است. در این مطالعه کنترلرهای اجسام در حال برخورد، رقابت استعماری و تکامل تفاضلی عملکرد بهینه‌تری از خود نشان داده‌اند.

واژگان کلیدی: کنترل فعال، بهینه‌سازی، ماتریس‌های وزنی، روش‌های فراکاوشی، گسسته‌سازی.

مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم‌های فراکاوشی در انتخاب بهینه‌ی ماتریس‌های وزنی LQR

جواد کاتبی (نویسنده‌ی مسئول)

استادیار، دانشگاه تبریز، گروه مهندسی عمران، تبریز،
jkatebi@tabrizu.ac.ir

مونا شعاعی پرچین

کارشناس ارشد سازه، دانشگاه تبریز، گروه مهندسی عمران، تبریز

۱- مقدمه

کنترل ضربه‌ای و روش‌های کنترل مقاوم H_{∞} و H_2 اشاره کرد. شرح مختصری از این روش‌ها در مرجع [۱] آمده است. در این میان روش LQR به دلیل تأثیر چشمگیر و ساده بودن به کارگیری آن به عنوان محبوب‌ترین کنترلر در کنترل فعال و نیمه‌فعال سازه‌ها به کار می‌رود. در این روش شاخص عملکرد مرتبه‌ی دومی تعریف و بهینه می‌شود که با اعمال وزن‌های مناسب به پاسخ‌ها و نیروهای کنترل سعی در برقراری تعادلی بهینه بین پارامترهای مربوط به این وزن‌ها در فرآیند بهینه‌سازی می‌نماید. در تعریف شاخص عملکرد اهمیت نسبی کاهش پاسخ و میزان نیروی کنترل از طریق تنظیم مناسب ماتریس‌های وزنی مشخص می‌گردد. ماتریس‌های وزنی از جمله پارامترهای مهم طراحی هستند؛ با توجه به اینکه رابطه مستقیمی بین المان‌های این

سازه‌های مجهز به تجهیزات کنترل فعال از قابلیت تطبیق خصوصیات دینامیکی خود در برابر ارتعاشات زلزله برخوردارند و از این رو سازه‌های هوشمند تلقی می‌شوند. یک سیستم کنترل فعال با تکیه بر تئوری‌های مدون و بر اساس وضعیت پاسخ سازه اقدام به محاسبه و اعمال نیروهای کنترلی در لحظات مختلف وقوع زلزله کرده و توانایی قابل توجهی در بهبود پاسخ سازه دارد. عملکرد دستگاه‌های کنترل به میزان زیادی به الگوریتم کنترل اعمالی جهت محاسبه و تنظیم نیروی کنترل وابسته است. استراتژی‌های متنوعی برای بهبود عملکرد سازه‌های هوشمند ارائه شده‌اند که از جمله رایج‌ترین آنها می‌توان به تنظیم‌کننده‌ی خطی مرتبه‌ی دوم (LQR)^۱، کنترل مود لغزشی (SMC)^۲، تخصیص قطب^۳، کنترل پیش‌بین^۴،

کنترلر LQG^۸ به کار گرفته‌اند. جهت پرهیز از تنظیم مجدد وزن‌های LQR، الگوریتم ABC برای انتخاب بهینه‌ی ماتریس‌های Q و R در سیستم پاندول معکوس استفاده شده است [۱۰]. حمیدی [۱۱] یک سیستم کنترل با وزن‌های بهینه توسط الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)^۹ برای سیستم فرود هواپیما طراحی کرده و عملکرد آن را با الگوریتم ژنتیک مقایسه نموده است. امینی و همکاران [۱۲] روشی بهینه برای یافتن نیروی کنترل میراگر جرم فعال ارائه کردند. در این روش برای حذف سعی و خطا از PSO برای تعیین ماتریس بهره‌ی پس‌خور در باندهای فرکانسی مختلف از طریق به‌روزرسانی ماتریس‌های وزنی LQR استفاده شده است. همچنین برخی فن‌های دیگر فراکاوشی مانند الگوریتم مورچگان [۱۳]، الگوریتم ممتیک^{۱۰} [۱۴] و رقابت استعماری (ICA)^{۱۱} [۱۵] جهت افزایش کارایی کنترلر LQR برای انتخاب وزن‌ها به خدمت گرفته شده‌اند. نتایج مطالعات انجام یافته در این زمینه حاکی از عملکرد رضایت‌بخش الگوریتم‌های فراکاوشی در تنظیم بهینه‌ی ماتریس‌های وزنی بوده و در مقایسه با روش سعی و خطا نتایج بهینه‌تری حاصل شده است. با وجود تنوع و تعدد روش‌های فراکاوشی که تاکنون معرفی شده و در حوزه‌های مختلف مهندسی به کار گرفته شده‌اند استفاده از آنها در طراحی کنترلرهای بهینه برای سازه‌های عمرانی کمرنگ بوده و مقایسه‌ی قابلیت‌های آنها تاکنون در زمینه‌ی کنترل فعال سازه‌های مهندسی عمران صورت نگرفته است.

هدف اصلی این پژوهش ارائه‌ی یک رویکرد بهینه جهت انتخاب هوشمند ماتریس‌های وزنی به کمک روش‌های فراکاوشی و تبدیل موجک^{۱۲} است تا تنظیم این ماتریس‌ها به صورت الگوریتمی و بدون عملیات زمان‌بر سعی و خطا صورت گیرد. در این راستا ابتدا معادلات دینامیکی سازه‌ی مجهز به ابزار کنترل فعال نوشته شده و با استفاده از تبدیل موجک، تحریک زلزله در باندهای فرکانسی معینی تجزیه می‌گردد. سپس المان‌های ماتریس وزنی با هدف کمینه کردن شاخص عملکرد مبتنی بر موجک به صورت اتوماتیک طی فرآیند بهینه‌سازی توسط فن‌های فراکاوشی در هر باند فرکانسی جستجو می‌شود و کنترلر مبتنی بر این ماتریس‌های وزنی بهینه بر روی سازه‌ی مورد مطالعه اعمال می‌گردد. به‌منظور مقایسه‌ی عملکرد روش‌های بهینه‌سازی، تابع هدف معرفی شده با شش الگوریتم رقابت استعماری (به‌عنوان الگوریتم اجتماعی)،

ماتریس‌ها و مشخصات مطلوب سیستم کنترل وجود ندارد، روش سیستماتیک و معینی برای تعیین این ماتریس‌ها ارائه نشده و انتخاب وزن‌ها بر اساس سعی و خطا و تجربیات طراح صورت می‌گیرد که فرآیندی پیچیده و زمان‌بر است [۲].

تاکنون روش‌های مختلفی جهت تعیین وزن‌ها پیشنهاد شده‌اند. در سال ۱۹۶۴ کالمن [۱] روشی برای انتخاب وزن‌ها بر اساس قطب‌های سیستم ارائه داد. ماتریس‌های یکه توسط لینچ و لو [۳] و ماتریس‌های قطری توسط آلد میر و همکاران [۴] به‌عنوان ماتریس‌های وزنی انتخاب شده‌اند. از ترکیب ماتریس‌های جرم و سختی نیز به‌عنوان ماتریس‌های وزنی استفاده شده است [۵]. باسو و ناگاراچیا [۲] یک الگوریتم LQR تطبیقی متغیر با زمان ارائه دادند که از اطلاعات حاصل از تبدیل موجک پاسخ برای یافتن توزیع انرژی محلی در محدوده‌های فرکانسی استفاده می‌کند. در این روش ماتریس‌های وزنی بر اساس انرژی و به صورت آنلاین توسط ضرایب اسکالر به‌روز می‌شوند.

روش‌های جستجوی هدایت‌شده نظیر روش‌های فراکاوشی جزو روش‌های هوشمند بهینه‌سازی هستند که از اطلاعات کسب‌شده در روند جستجو در یافتن مقادیر بهینه بهره می‌گیرند. از جمله قابلیت‌های این الگوریتم‌ها می‌توان به توانایی جستجوی مؤثر فضاهای بزرگ در زمان کم، عدم نیاز به مشتق (گرادیان) تابع هدف، توانایی گریز از نقاط بهینه‌ی محلی، قابلیت کار با متغیرهای تصمیم زیاد، استفاده از قوانین احتمالی در فرآیند جستجو و ... اشاره کرد. توانایی این الگوریتم‌های بهینه‌سازی در حل مسائل پیچیده و غیرخطی می‌تواند انعطاف بسیاری را در طراحی و بهینه‌سازی کنترلر به وجود آورد. در برخی تحقیقات مرتبط با کنترل سازه‌ها از جمله مسئله‌ی انتخاب ماتریس‌های وزنی LQR الگوریتم‌های فراکاوشی به کار گرفته شده‌اند.

لیو و وانگ [۶] از بهینه‌سازی چند هدفه و شن [۷] از الگوریتم ژنتیک (GA)^۵ برای انتخاب وزن‌ها در سیستم پاندول معکوس بهره گرفته‌اند. جغتایی و محبی [۸] الگوریتم کنترل فعال بهینه‌ای را بر اساس روش انتگرال‌گیری غیرخطی نیومارک و الگوریتم ژنتیک توزیع‌شده (DGA)^۶ ارائه دادند که در آن ماتریس‌های وزنی به کمک DGA تعیین می‌گردد. ونگ و همکاران [۹] الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی (ABC)^۷ را در حل مسئله‌ی بهینه‌سازی وزن‌ها برای آنتن‌های سروو بزرگ با

$$B = \begin{bmatrix} O \\ M^{-1}H \end{bmatrix}_{2n \times n}$$

$$E = \begin{bmatrix} O \\ -M^{-1}\Gamma \end{bmatrix}_{2n \times n}$$

H بردار محل اعمال نیروهای کنترل بوده و اگر محرک‌ها در تمام طبقات نصب شوند $H = \{1\}_{n \times 1}$. بردار Γ موقعیت نیروهای خارجی وارد بر سیستم (نیروهای زلزله) را نمایش می‌دهد $\Gamma = \{1\}_{n \times 1}$. O و I به ترتیب ماتریس‌های مربعی صفر و یکه با بعد n هستند و T نماد ترانهاده‌ی بردار یا ماتریس می‌باشد. M، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه، $\ddot{x}_g(t)$ شتاب حرکت زمین و $U(t)$ بردار نیروهای کنترل می‌باشد. ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی سازه بر اساس جرم، سختی و میرایی هر طبقه از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$M_{ij} = \begin{cases} m_i & i = j \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$K_{ij} = \begin{cases} k_i + k_{i+1} & i = j \neq n \\ k_n & i = j = n \\ -k_i & i - j = 1 \\ -k_{i+1} & j - i = 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

$$C_{ij} = \begin{cases} c_i + c_{i+1} & i = j \neq n \\ c_n & i = j = n \\ -c_i & i - j = 1 \\ -c_{i+1} & j - i = 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

در این روابط m_i ، k_i و c_i به ترتیب جرم، سختی و میرایی طبقه‌ی i ام هستند و n درجه‌ی آزادی سیستم می‌باشد.

تنظیم‌کننده‌ی خطی مرتبه‌ی دو یا به اختصار LQR به‌عنوان روش پایه‌ی تئوری کنترل مدرن و متداول‌ترین تئوری کنترل بهینه‌ی خطی، به دلیل راحتی پیاده‌سازی در مسائل مهندسی رایج‌ترین الگوریتم محاسبه‌ی نیروهای کنترلی محسوب می‌شود. در روش LQR شاخص عملکرد J (رابطه ۴) کمینه می‌شود و با اتخاذ قانون کنترل پس‌خور (رابطه ۵)، انرژی کنترل از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد.

تکامل تفاضلی (DE)^{۱۳} (نماینده‌ی الگوریتم‌های تکاملی)، خفاش^{۱۴} و کرم شب‌تاب^{۱۵} (الگوریتم‌های الهام گرفته شده از طبیعت)، اجسام در حال برخورد^{۱۶} (الگوریتم فیزیکی) و جستجوی هارمونی^{۱۷} (الگوریتم موسیقی) بهینه‌سازی می‌شود. مسئله‌ی کنترل ارتعاشات سازه‌ی سه درجه آزادی مجهز به تاندون فعال در برابر تحریک زلزله‌های مصنوعی توسط کنترلر پیشنهادی در نرم‌افزار متلب مدل‌سازی شده و بر اساس نتایج به دست آمده عملکرد الگوریتم‌های فراکاوشی از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

روند ارائه‌ی مقاله به شرح زیر است:

بخش ۲ به تعریف مسئله‌ی LQR و بخش ۳ به بیان مفصل فرمول‌بندی کنترلر بهینه‌ی پیشنهادی اختصاص می‌یابد. در بخش ۴ ابتدا مشخصات دینامیکی سازه و زلزله‌های تحت مطالعه معرفی می‌شود. سپس در هر زیربخش ضمن معرفی عناصر و عملگرهای الگوریتم‌های فراکاوشی، نتایج شبیه‌سازی‌های عددی در قالب جداول و نمودارها ارائه شده و عملکرد کنترلر مبتنی بر آن در کنترل ارتعاشات سازه‌ی نمونه تحت زلزله‌های مصنوعی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت مقاله با بیان یافته‌ها و نتایج در بخش ۵ خاتمه می‌پذیرد.

۲- معادلات حرکت سازه‌ی مجهز به سیستم تاندون فعال

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد در کنترل فعال جهت بهبود پاسخ‌های سازه می‌توان یک ورودی ثانوی به سازه اعمال کرد که جهت و مقدار این نیرو توسط یک الگوریتم کنترل محاسبه می‌شود. معادلات دینامیکی ارتعاش یک سازه‌ی n درجه آزاد مجهز به سیستم تاندون فعال، تحت تحریک زلزله در فرم فضای حالت به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + E\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

$$X(t) = [q(t), \dot{q}(t)]^T \quad (2)$$

که در آن X بردار حالت نامیده می‌شود و شامل بردارهای تغییر مکان q(t) و سرعت $\dot{q}(t)$ (رابطه ۲) می‌باشد.

A ماتریس سیستم، B ماتریس تأثیر کنترل و E ماتریس تأثیر تحریک زلزله است.

$$A = \begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$$

۳- توسعه‌ی تابع هدف مبتنی بر موجک و فرمول‌بندی کنترلر پیشنهادی

به دلیل محتوای فرکانسی متفاوت زلزله‌های مختلف، تضمینی برای عملکرد مناسب کنترلر طراحی شده برای یک زلزله در برابر زلزله‌های دیگر وجود ندارد. در صورتی که فرکانس زلزله به فرکانس طبیعی سازه نزدیک باشد پاسخ‌های سازه تشدید می‌گردند. جهت افزایش دقت و کارایی کنترلر طراحی شده در برابر زلزله‌های مختلف در این مقاله با بهره‌گیری از قابلیت‌های تجزیه‌ی موجک گسسته^{۱۸} عملیات جستجو و انتخاب عناصر ماتریس‌های وزنی و طراحی کنترلر بهینه‌ی هوشمند متناسب با ویژگی‌های فرکانسی محدوده‌های مختلف تحریک زلزله توسط روش‌های فراکاوشی انجام می‌گیرد.

تبدیل موجک تبدیلی است که سیگنال $x(t)$ را به مجموعه‌ای از تابع اولیه‌ی $\psi_{j,k}(t)$ که تابع مادر نامیده می‌شود تجزیه می‌کند. با اعمال تبدیل موجک به عنوان یک فیلتر، سیگنال به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود. خروجی عبوری از فیلتر پایین‌گذر سیگنال تقریب $(A)^{۱۹}$ و خروجی عبوری از فیلتر بالاگذر سیگنال جزئیات $(D)^{۲۰}$ نام دارد. عبور سیگنال از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر تا سطح مورد نظر J^* ادامه می‌یابد.

$$D_j(t) = \sum_{k \in Z} cD_j(k) \psi_{j,k}(t) \quad (۸)$$

$$cD_j(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad (۹)$$

$$A_j(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} cA_j(k) \varphi_{j,k}(t) \quad (۱۰)$$

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \varphi(2^j t - k) \quad (۱۱)$$

$$cA_j(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \varphi_{j,k}(t) dt \quad (۱۲)$$

cD_j ضریب موجک، $\varphi_{j,k}$ تابع مقیاس و cA_j ضریب مقیاس سطح J^* نامیده می‌شوند. در نهایت سیگنال تجزیه شده به J^* سطح می‌تواند توسط رابطه (۱۳) بازسازی شود.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (X^T Q X + U^T R U) dt \quad (۴)$$

$$G = -R^{-1} B^T P \quad (۵)$$

$$\{U(t)\}_{n \times 1} = -[G]_{n \times 2n} \{X(t)\}_{2n \times 1} \quad (۶)$$

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = -\dot{P} \quad (۷)$$

در این روابط ماتریس G ماتریس بهره‌ی پسخور نامیده می‌شود که از طریق رابطه (۵) و با حل معادله‌ی جبری ریکاتی (رابطه ۷) به دست می‌آید و ماتریس مقارن P پاسخ معادله‌ی ریکاتی می‌باشد. Q و R به ترتیب به ماتریس‌های وزنی حالت‌ها و نیروهای کنترل موسوم هستند. ارتباط مشخصی بین عناصر این ماتریس‌ها و مشخصات مطلوب سیستم وجود ندارد اما مقادیر وزن‌ها به طور مستقیم عملکرد سیستم کنترلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با وجود تأثیر قابل ملاحظه‌ی ماتریس‌های وزنی در موفقیت اهداف کنترل، تاکنون روش سیستماتیکی برای تعیین آنها ارائه نشده و از روند سعی و خطا در تعیین این ماتریس‌ها بهره گرفته می‌شود. مقادیر اعضای ماتریس‌های وزنی اهمیت پارامترهای مربوط به آنها را در کمینه‌سازی شاخص عملکرد نشان می‌دهد. ماتریس Q بیانگر اهمیت نسبی بردار حالت بوده و الزاماً یک ماتریس نیمه‌مثبت معین ($\det(Q) \geq 0$) می‌باشد. هرچه مقادیر اعضای ماتریس Q بزرگ‌تر باشد با صرف نیروی بیشتر، کاهش قابل ملاحظه‌تری در پاسخ حاصل خواهد شد. ماتریس مثبت معین R ($\det(R) > 0$) اهمیت نسبی نیروی کنترل را در فرآیند بهینه‌سازی بیان می‌کند و بزرگ بودن عناصر این ماتریس بیانگر اهمیت بیشتر کاهش نیروی کنترل نسبت به کاهش پاسخ در روند طراحی کنترلر است. با انتخاب مناسب وزن‌ها می‌توان تعادلی بین مقادیر پاسخ و هزینه‌های کنترل ایجاد نمود. در این پژوهش انتخاب و تنظیم ماتریس‌های وزنی متناسب با ویژگی‌های هر محدوده‌ی فرکانسی از تحریک زلزله توسط تکنیک‌های فراکاوشی انجام می‌گیرد.

$$U(t) = -G_{j^*} X_{j^*}(t) - \sum_{j \leq J^*} G_j X_j(t) \quad (18)$$

عدم رعایت محدودیت تغییر مکان سبب کاهش ایمنی شده و وجود حد بالای نیروی کنترل علاوه بر رعایت محدودیت ظرفیت ابزارهای اعمال نیرو، مانع ناپایداری سیستم می‌شود. در این پژوهش ماکزیمم نیروی کنترل مجاز و ماکزیمم دریافت مجاز به ترتیب برابر ۱۰kN و ۰/۰۲ در نظر گرفته شده‌اند.

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، برای اینکه مسئله‌ی LQR پاسخ حقیقی داشته باشد، Q باید ماتریس وزنی مربعی نیمه‌مثبت معین با بعد 2n (تعداد حالات سیستم) $(\det(Q) \geq 0)$ و R ماتریس وزنی مربعی مثبت معین $(\det(R) > 0)$ با بعد r باشد که r تعداد محرک‌ها می‌باشد. این موضوع باید در تعریف متغیرهای بهینه‌سازی نیز لحاظ شود. از این رو ماتریس‌های وزنی به فرم رابطه (۱۹) در نظر گرفته می‌شوند تا شرایط مسئله را ارضا کنند. ماتریس Q به صورت حاصل ضرب ماتریس q در دترمینان آن تعریف شده و همواره شرط نیمه‌مثبت معین بودن را خواهد داشت. ماتریس R نیز به فرم یک ماتریس قطری در نظر گرفته می‌شود تا شرایط یک ماتریس مثبت معین را دارا باشد:

$$Q_{j^*} = q_{j^*}^T q_{j^*} \quad \& \quad Q_j = q_j^T q_j \quad (19)$$

$$R_j = 10^{-r_j} \text{eye}(n) \quad \& \quad R_{j^*} = 10^{-r_{j^*}} \text{eye}(n)$$

که q_{ik} (المان‌های ماتریس q) و عدد صحیح r (توان مربوط به ماتریس وزنی R) متغیرهای طراحی در فرآیند بهینه‌سازی هستند. رویکرد پیشنهادی یک روش کنترل بهینه‌ی خطی مبتنی بر تجزیه‌ی موجک است که قابلیت‌های روش‌های بهینه‌سازی فراکاوشی را در تنظیم ماتریس‌های وزنی به خدمت می‌گیرد. با اتخاذ این روند طراحی کنترل از حالت تجربی و سعی و خطا درآمده و یک مبنای الگوریتمیک بهینه برای طراحی ایجاد می‌گردد و در کنار آن مشخصات ویژه نظیر بهبود پاسخ‌ها و کاهش نیروی کنترل برای سیستم به ارمغان می‌آید.

با توجه به تعدد روش‌های هوشمند بهینه‌سازی و به دلیل نبود مطالعات منسجم در مقایسه‌ی این روش‌ها به ویژه در زمینه‌ی کنترل فعال

$$x(t) = A_{j^*}(t) + \sum_{j \leq J^*} D_j(t) \quad (13)$$

به عنوان نخستین گام جهت مدل‌سازی کنترلر پیشنهادی، از تبدیل موجک گسسته برای تجزیه‌ی رکورد زلزله به چندین باند فرکانسی بهره گرفته می‌شود. اگر سیگنال زلزله $\ddot{x}_g(t)$ توسط تبدیل موجک به J^* سطح تجزیه شود داریم:

$$\ddot{x}_g(t) = A_{j^*}(t) + \sum_{j \leq J^*} D_j(t) \quad (14)$$

که D_j ، زامین سیگنال جزئیات و A_{j^*} سیگنال تقریب سطح J^* است. با اتخاذ این رویکرد فرمول‌بندی شاخص عملکرد LQR به شکل زیر تغییر می‌یابد (J):

$$J = \int_0^t [X_{j^*}(t)^T Q_{j^*} X_{j^*}(t) + U_{j^*}(t)^T R_{j^*} U_{j^*}(t)] dt \quad (15)$$

$$+ \sum_{j \leq J^*} \int_0^t [X_j(t)^T Q_j X_j(t) + U_j(t)^T R_j U_j(t)] dt$$

تمامی مراحل شبیه‌سازی از جمله محاسبه‌ی عددی انتگرال رابطه (۱۵) در نرم‌افزار متلب انجام می‌گیرد.

در این پژوهش سیگنال زلزله توسط موجک مادر دابچیز ۱۰ (db10) تا $J^* = 5$ سطح تجزیه می‌شود.

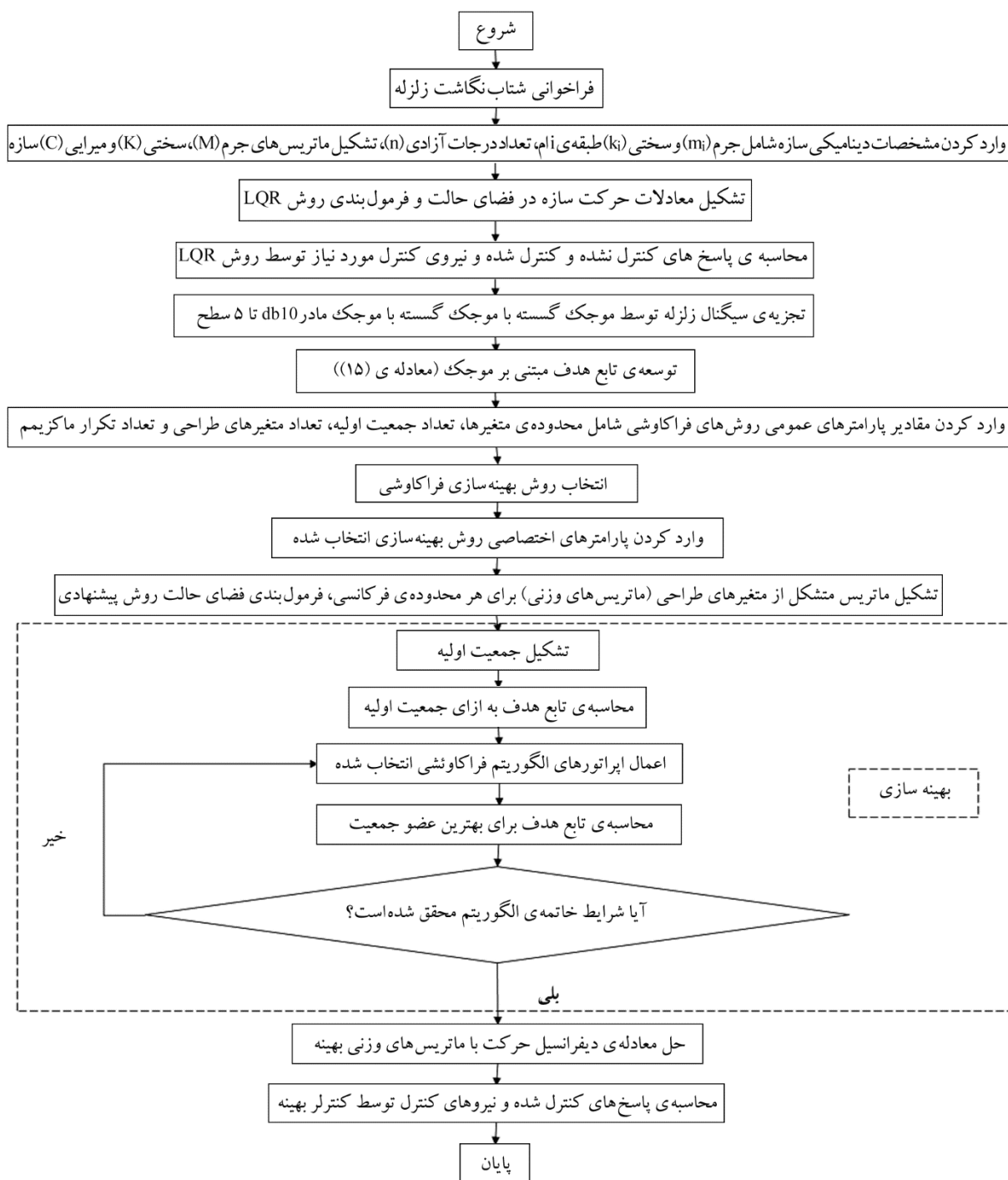
Q_{j^*} و R_{j^*} به ترتیب ماتریس‌های وزنی حالت و نیروی کنترل برای سیگنال تقریب سطح J^* و Q_j و R_j ماتریس‌های وزنی حالت و نیروی کنترل برای سیگنال جزئیات سطح J^* می‌باشند. با در نظر گرفتن شاخص عملکرد مبتنی بر موجک J (رابطه ۱۵) به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی، روش‌های فراکاوشی جهت جستجوی المان‌های ماتریس‌های وزنی در بازه‌ی پیوسته‌ی [۰/۰۱، ۱] برای هر باند فرکانسی به کار گرفته می‌شوند. در نهایت نیروی کنترل از فرمول زیر به دست می‌آید.

$$U_{j^*}(t) = -G_{j^*} X_{j^*}(t) \quad (16)$$

$$U_j(t) = -G_j X_j(t) \quad (17)$$

ایجاد می‌نماید. مدل‌سازی عددی سازه‌ی هوشمند و طراحی کنترلر در محیط نرم‌افزار متلب انجام شده و کارایی و تأثیر هر الگوریتم در کاهش ارتعاش سازه‌ی نمونه تحت زلزله‌های مختلف ارزیابی می‌شود. سپس نتایج و مزایای هر روش ارائه شده و مورد مقایسه قرار می‌گیرد. شکل (۱) فلوجارت روش پیشنهادی را ارائه می‌دهد.

سازه‌ها، در این مطالعه از شش الگوریتم رقابت استعماری، تکامل تفاضلی، خفاش، کرم شب‌تاب، اجسام در حال برخورد و جستجوی هارمونی به صورت جداگانه بهره گرفته شده و مقایسه‌ای بین عملکرد آنها صورت می‌گیرد. فرمول‌بندی ارائه شده به آسانی با هر الگوریتم بهینه‌سازی فراکاشی قابل اجراست و انعطاف زیادی در طراحی کنترلر



شکل (۱): فلوجارت کنترلر بهینه‌ی پیشنهادی.

۴- شبیه‌سازی عددی و نتایج

جهت بررسی عملکرد کنترلر پیشنهادی قاب برشی سه طبقه مجهز به سیستم تاندون فعال با مشخصات ذکر شده در جدول (۱) برای مدل‌سازی انتخاب می‌شود.

جدول (۱): مشخصات دینامیکی سازه‌ی سه درجه آزادی مورد مطالعه.

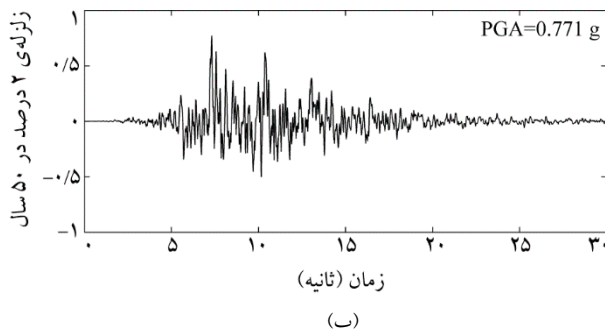
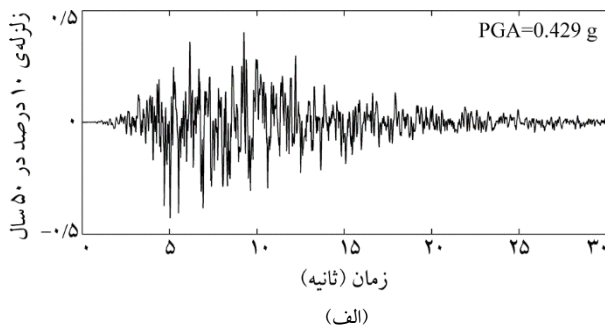
طبقه	جرم (ton)	سختی (kN/m)	نسبت میرایی (ξ)
۳-۱	۱	۹۸۰	۰/۰۴, ۰/۰۲۸, ۰/۰۱

محرک‌ها در تمام طبقات قرار گرفته و نیروهای کنترل را به سازه اعمال می‌نمایند.

به منظور بررسی کارایی کنترلر در برابر زلزله‌های مختلف، سازه‌ی معرفی شده تحت دو زلزله‌ی مختلف قرار می‌گیرد. زلزله‌ی مصنوعی تولید شده با سطح خطر ۲ درصد در ۵۰ سال و زلزله‌ی مصنوعی تولید شده با سطح خطر ۱۰ درصد در ۵۰ سال. فاطمی و همکاران [۱۶] مجموعه‌ای از رکوردهای پروژه‌ی فولادی SAC را برای به دست آوردن پارامترهای تولید شتاب‌نگاشت سطح خطر یکنواخت استفاده کرده و شتاب‌نگاشت‌هایی با سطح خطر ۱۰ درصد در ۵۰ سال و ۲ درصد در ۵۰ سال برای مناطق جغرافیایی مشخص تولید کرده‌اند. در این مقاله با استفاده از روش به کار گرفته شده در این مرجع و پارامترهای به دست آمده در آن اقدام به تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی می‌شود که جهت اختصار از ارائه‌ی جزئیات و جداول مربوطه صرف نظر می‌شود. در شکل (۲) تاریخچه‌ی زمانی شتاب‌نگاشت‌های تولید شده نمایش داده شده است.

علاوه بر شاخص عملکرد مبتنی بر موجک (رابطه ۱۵) که به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است، مقادیر ۹ شاخص مبنا نیز برای ارزیابی عملکرد کنترلر پیشنهادی به کمک وزن‌های بهینه محاسبه می‌شوند (جدول ۲).

علاوه بر شاخص عملکرد مبتنی بر موجک (رابطه ۱۵) که به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است، مقادیر ۹ شاخص مبنا نیز برای ارزیابی عملکرد کنترلر پیشنهادی به کمک وزن‌های بهینه محاسبه می‌شوند (جدول ۲).



شکل (۲): تاریخچه‌ی زمانی شتاب زلزله‌های مصنوعی تولید شده، (الف) زلزله‌ی ۱۰ درصد در ۵۰ سال، (ب) زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال.

در روابط ذکر شده در جدول (۲) پارامترهای $d_i(t)$ ، $\dot{d}_i(t)$ ، $x_i(t)$ ، $\ddot{x}_i(t)$ و m_i به ترتیب گریز طبقه، ارتفاع، تغییر مکان، شتاب و جرم طبقه‌ی i ام سازه می‌باشند. $f_i(t)$ نیروی کنترل تولید شده توسط I امین محرک و w وزن سازه است. بالانویس c و u_c به ترتیب به حالت‌های کنترل شده و کنترل نشده اشاره دارد.

روش‌های جستجوی هدایت شده نظیر الگوریتم‌های فراکاوشی جزو ابزارهای 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 دیگر قابلیت‌های این روش‌ها می‌توان به توانایی جستجوی مؤثر فضاهای بزرگ در زمان کوتاه و قابلیت کار با متغیرهای تصمیم زیاد اشاره کرد که آنها را به ابزاری قدرتمند و جذاب برای محققین مبدل کرده است. در ادامه ضمن معرفی اجمالی عملگرها و پارامترهای روش‌های فراکاوشی مورد مطالعه، عملکرد کنترلر مبتنی بر این روش‌ها تحت زلزله‌های مصنوعی با روش LQR و یکدیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

جدول (۲): فرمول های محاسبه ی شاخص های مبنای نه گانه [۱۷].

گرز طبقه	تغیر مکان	شتاب	برش پایه
$J_1 = \frac{\max_{t,i} \left \frac{d_i^c(t)}{h_i} \right }{\max_{t,i} \left \frac{d_i^{uc}(t)}{h_i} \right }$	$J_2 = \frac{\max_{t,i} \left x_i^c(t) \right }{\max_{t,i} \left x_i^{uc}(t) \right }$	$J_3 = \frac{\max_{t,i} \left \ddot{x}_{ai}^c(t) \right }{\max_{t,i} \left \ddot{x}_{ai}^{uc}(t) \right }$	$J_4 = \frac{\max_t \left \sum_i m_i \ddot{x}_{ai}^c(t) \right }{\max_t \left \sum_i m_i \ddot{x}_{ai}^{uc}(t) \right }$
RMS گرز طبقه	RMS تغییر مکان	RMS شتاب	RMS برش پایه
$J_5 = \frac{\max_{t,i} \left\ \frac{d_i^c(t)}{h_i} \right\ }{\max_{t,i} \left\ \frac{d_i^{uc}(t)}{h_i} \right\ }$	$J_6 = \frac{\max_{t,i} \left\ x_i^c(t) \right\ }{\max_{t,i} \left\ x_i^{uc}(t) \right\ }$	$J_7 = \frac{\max_{t,i} \left\ \ddot{x}_{ai}^c(t) \right\ }{\max_{t,i} \left\ \ddot{x}_{ai}^{uc}(t) \right\ }$	$J_8 = \frac{\max_t \left\ \sum_i m_i \ddot{x}_{ai}^c(t) \right\ }{\max_t \left\ \sum_i m_i \ddot{x}_{ai}^{uc}(t) \right\ }$
نیروی کنترل			
$J_9 = \frac{\max_{t,l} f_l(t) }{W}$			

می شود. ضعیف ترین استعمارگر ضعیف ترین مستعمره ی خود را از دست می دهد و در نهایت رقابت استعماری بین کشورهای استعمارگر برای تصاحب این مستعمره شکل می گیرد. گام های ذکر شده تا رضای شرایط توقف الگوریتم تکرار می گردد. در این پژوهش پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری به صورت زیر در نظر گرفته شده اند.

جدول (۳): پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری.

۳۰	N_{Pop}	تعداد جمعیت اولیه (تعداد کشورها)
۵۰	N_{iter}	تعداد تکرار ماکزیم
۳	N_{imp}	تعداد کشورهای استعمارگر
۲۷	N_{Col}	تعداد کشورهای مستعمره
۰/۳	Revolution Rate	نرخ انقلاب
۲	β	ضریب جذب

۴-۱-۱- کنترل ارتعاشات سازه ی نمونه با استفاده از کنترلر ICA

با اعمال کنترلر ICA بر روی سازه ی سه درجه آزادی، ماتریس های وزنی و پاسخ های سازه تحت اثر زلزله های مصنوعی محاسبه می شوند. تاریخچه ی زمانی تغییر مکان کنترل شده و کنترل نشده ی طبقه ی فوقانی تحت زلزله ی ۱۰ درصد در ۵۰ سال و نیروی کنترل مورد نیاز در شکل (۳) و پاسخ های سازه تحت تحریک زلزله ی ۲ درصد در ۵۰ سال در شکل (۴) ارائه شده است.

۴-۱- کنترلر مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

الگوریتم رقابت استعماری توسط آتشیز و لوکاس [۱۸] در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است که از پدیده ی استعمار در روند بهینه سازی الهام می گیرد. جمعیت آغازین در این روش کشور نامیده می شود که در آغاز فرآیند بهینه سازی در موقعیت های تصادفی جای دهی می گردند. با توجه به میزان بهینه بودن موقعیت قرارگیری کشورها، تعدادی از بهترین کشورها به عنوان استعمارگر انتخاب شده و کشورهای مستعمره متناسب با قدرت هر استعمارگر به طور تصادفی بین آنها تقسیم می شوند. با اعمال سیاست جذب، مستعمرات به سمت استعمارگر متناظر خود حرکت داده می شوند. عملگر جذب به صورت رابطه (۲۰) فرمول بندی می شود:

$$x_{col}^{new} = x_{col}^{old} + \beta \otimes (x_{imp} - x_{col}^{old}) \quad 0 \leq \beta \leq 2 \quad (20)$$

x_{col}^{old} ، x_{col}^{new} و x_{imp} به ترتیب موقعیت استعمارگر، موقعیت قبلی مستعمره و موقعیت جدید آن می باشد و β ضریب جذب نامیده می شود. در گام بعدی حرکت تصادفی مستعمرات با عملگر انقلاب اعمال می گردد که سبب می شود تا روند جستجو از دام بهینه های محلی نجات یابد. اگر پس از اعمال سیاست های جذب و انقلاب، مستعمرات به موقعیت بهتر از استعمارگر متناظر خود برسند (تابع هدف بهینه تر)، موقعیت استعمارگر با بهترین مستعمره ی خود تعویض

همان گونه که نمودارها نشان می‌دهد، کنترلر مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری قادر به کاهش قابل ملاحظه‌ی پاسخ سازه نسبت به حالت کنترل نشده می‌باشد.

۴-۲- کنترلر مبتنی بر الگوریتم تکامل تفاضلی (DE)

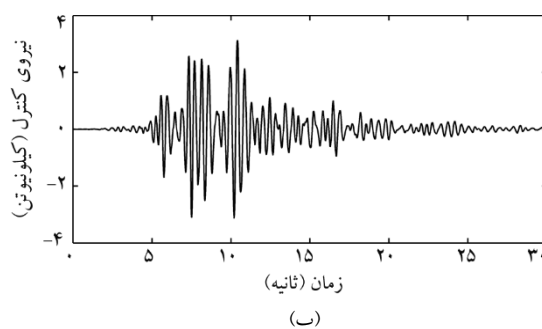
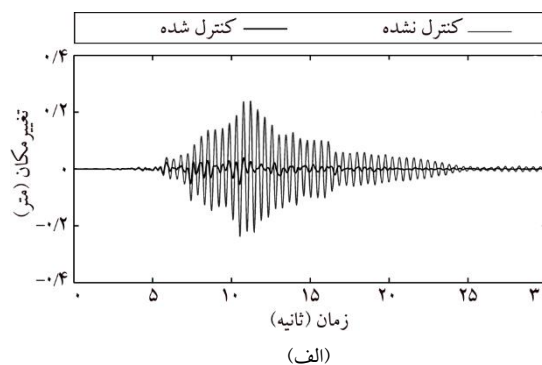
الگوریتم‌های تکامل پذیر روش‌هایی بر مبنای جستجوی تصادفی‌اند که از مدل‌سازی تکامل بیولوژیکی الگوبرداری شده‌اند. الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی یک روش فراکاوشی هوشمند و مبتنی بر جمعیت است که در سال ۱۹۹۵ توسط استورن و پرایس [۱۹] برای غلبه بر مشکل فقدان جستجوی محلی در GA ارائه شده است. DE کار خود را با انتخاب جمعیتی از پاسخ‌های تصادفی آغاز می‌کند. هر انتخاب معرف یک جواب مسئله در فضای جستجو است و در تکرارهای بعدی با به‌روز شدن موقعیت اعضا، جواب‌ها بهبود یافته و در نتیجه جمعیت به سمت جواب بهینه هدایت می‌شود. در این روش بردار موقعیت اعضای جمعیت به کمک بردار تفاضل به شکل زیر تغییر می‌یابد:

$$d = a + F \otimes (b - c) \quad (21)$$

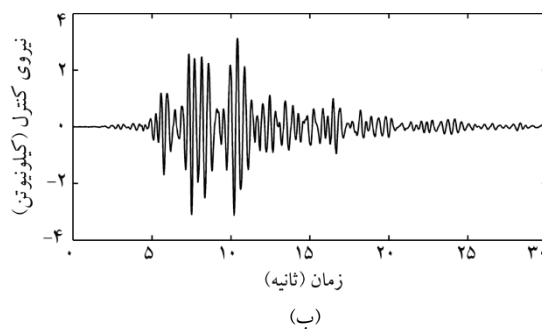
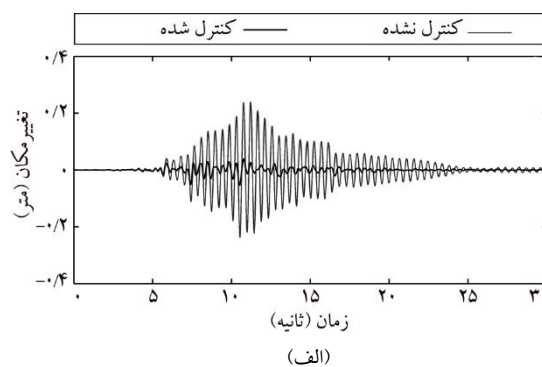
که در آن b و c دو عضو به تصادف انتخاب شده از جمعیت a و b هستند و ضریب مقیاس F تأثیر تفاضل را در تولید پاسخ‌های جدید مشخص می‌نماید. برای ایجاد پاسخ نهایی e عملگر تقاطع بر روی d و عضو به تصادف انتخاب شده x اعمال می‌شود. در DE برخلاف GA گام‌های مربوط به عمل جهش از توزیع احتمالی مشخصی پیروی نمی‌کند، بلکه تفاضل میان دو عضو جمعیت که به تصادف انتخاب شده‌اند به عضو سوم اضافه شده و پاسخ جهش یافته از فاصله‌ی موجود میان جمعیت تولید می‌گردد. موقعیت اعضای جدید با دیگر اعضا مقایسه شده و بهترین پاسخ در هر مرحله انتخاب می‌شود. این روند تا ارضای شرایط خاتمه‌ی الگوریتم ادامه می‌یابد. در این مقاله پارامترهای الگوریتم تکامل تفاضلی به صورت زیر انتخاب شده‌اند:

جدول (۴): پارامترهای الگوریتم تکامل تفاضلی.

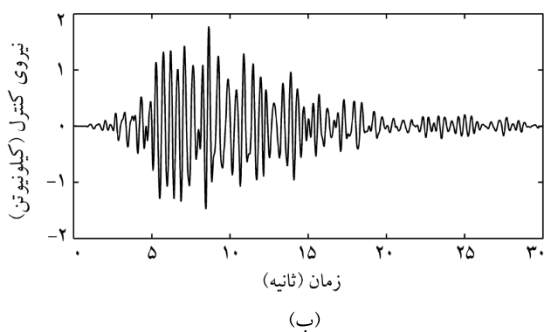
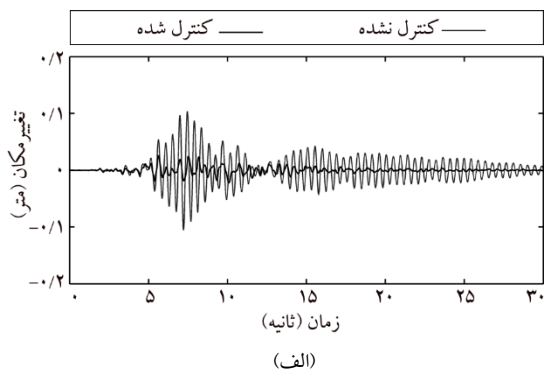
۳۰	NPop	تعداد جمعیت اولیه
۵۰	NIter	تعداد تکرار ماکزیمم
۰/۵	F	ضریب مقیاس
۰/۳	CR	احتمال تقاطع



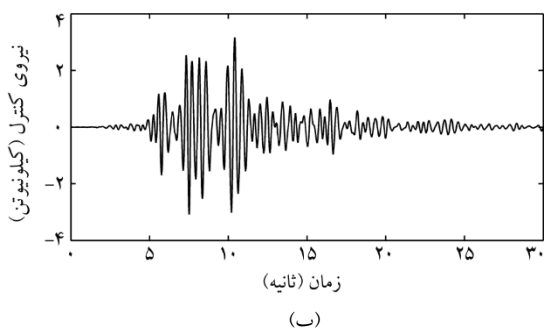
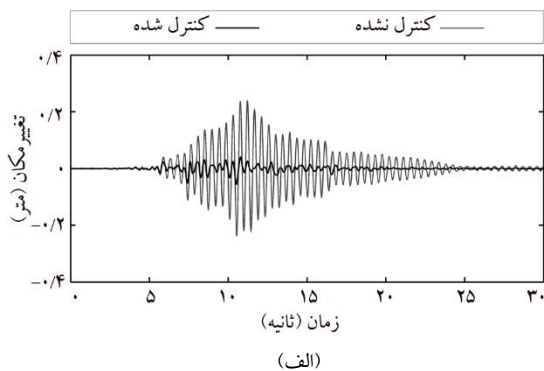
شکل (۳): نتایج کنترلر مبتنی بر ICA در سازه‌ی سه درجه آزادی تحت زلزله‌ی ۱۰ درصد در ۵۰ سال (الف) تاریخچه‌ی تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی (ب) تاریخچه‌ی نیروی کنترل طبقه‌ی فوقانی.



شکل (۴): نتایج کنترلر مبتنی بر ICA در سازه‌ی سه درجه آزادی تحت زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال (الف) تاریخچه‌ی تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی (ب) تاریخچه‌ی نیروی کنترل طبقه‌ی فوقانی.



شکل (۵): نتایج کنترل مبتنی بر DE در سازه‌ی سه درجه آزادی تحت زلزله‌ی ۱۰ درصد در ۵۰ سال (الف) تاریخچه‌ی تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی (ب) تاریخچه‌ی نیروی کنترل طبقه‌ی فوقانی.



شکل (۶): نتایج کنترل مبتنی بر DE در سازه‌ی سه درجه آزادی تحت زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال (الف) تاریخچه‌ی تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی (ب) تاریخچه‌ی نیروی کنترل طبقه‌ی فوقانی.

۴-۲-۱- کنترل ارتعاشات سازه‌ی نمونه با استفاده از کنترلر DE

پاسخ‌های کنترل نشده و کنترل شده‌ی سازه با کنترلر DE تحت تحریک زلزله‌ی ۱۰ درصد در ۵۰ سال و ۲ درصد در ۵۰ سال به ترتیب در شکل (۵) و شکل (۶) ارائه شده‌اند. عملکرد مطلوب DE در طراحی کنترلر بهینه با توجه به نمودارهای به‌دست آمده تأیید می‌گردد.

۴-۳- کنترلر مبتنی بر الگوریتم خفاش (BA)

الگوریتم خفاش توسط یانگ در سال ۲۰۱۰ [۲۰] ارائه شده است و از انعکاس صوت خفاش‌ها در یافتن و شکار طعمه الهام می‌گیرد. ابتدا جمعیت اولیه‌ی خفاش‌ها به صورت تصادفی تشکیل می‌شود. سپس خفاش‌ها با سرعت v_i از محل x_i با فرکانس f_i و بلندی صوت A_0 جهت یافتن و شکار طعمه حرکت می‌کنند. موقعیت (x_i) ، فرکانس (f_i) و سرعت (v_i) برای خفاش i ام متعاقباً در طول تکرارهای الگوریتم (t) بر اساس روابط زیر به‌روزرسانی می‌شود. $\beta \in [0,1]$ بردار تصادفی با توزیع یکنواخت می‌باشد.

$$f_i = f_{\min} + \beta \times (f_{\max} - f_{\min}),$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x_{i*}^t) f_i,$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t$$

f_{\max} و f_{\min} فرکانس‌های مینیمم و ماکزیمم هستند که به‌عنوان پارامترهای ورودی توسط طراح در ابتدا مقداردهی می‌شوند و X_{i*}^t خفاش دارای بهترین موقعیت است. سپس موقعیت خفاش‌ها (x_{old}) توسط فرمول زیر با بردار تصادفی ε به‌روز x_{new} می‌شود.

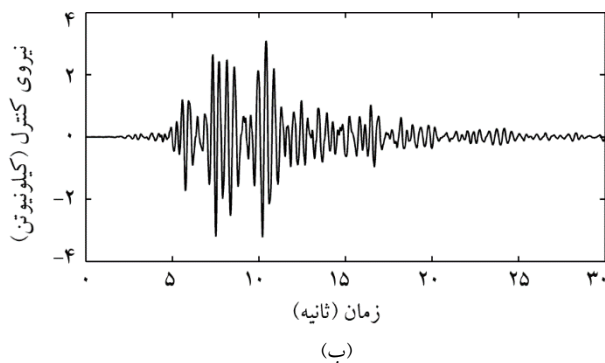
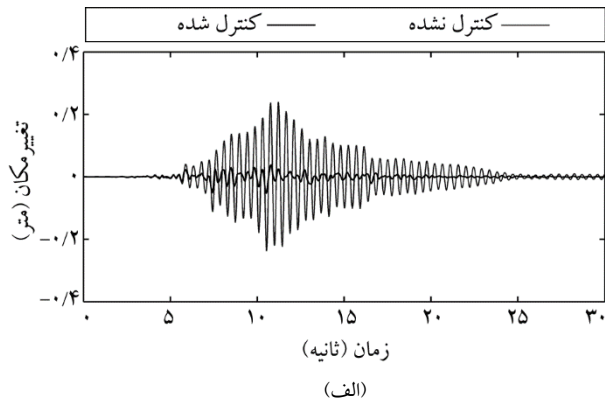
$$x_{new} = x_{old} + \varepsilon A^t$$

پس از اعمال گام تصادفی بلندی صوت و نرخ انتشار پالس نیز با معادلات زیر به‌روزرسانی می‌شود. α و γ ضرایب ثابت هستند.

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)]$$

پاسخ‌های سازه‌ی سه درجه آزادی تحت تحریک زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال و نیروی کنترل مورد نیاز در شکل (۸) ارائه شده‌اند.



شکل (۸): نتایج کنترل مبتنی بر BA در سازه‌ی سه درجه آزادی تحت زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال (الف) تاریخچه‌ی تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی (ب) تاریخچه‌ی نیروی کنترل طبقه‌ی فوقانی.

عملکرد موفقیت‌آمیز کنترلر BA در ارائه‌ی پاسخ‌های بهینه نسبت به حالت کنترل‌نشده با توجه به شکل‌های (۷) و (۸) مشهود است.

۴-۴- کنترل مبتنی بر الگوریتم کرم شب‌تاب (FA)

الگوریتم کرم شب‌تاب توسط یانگ در سال ۲۰۰۸ [۲۱] توسعه داده شده است که بر اساس ایده‌آل‌سازی خصوصیات چشمک‌زنی کرم‌های شب‌تاب عمل می‌نماید. نخست جمعیت آغازین کرم‌های شب‌تاب در مکان‌های تصادفی جایگذاری می‌شوند. با محاسبه‌ی تابع هدف برای هر کرم شب‌تاب (i)، کرم‌های دیگر به سمت کرم پرنورتر طبق معادله‌ی زیر حرکت می‌کنند.

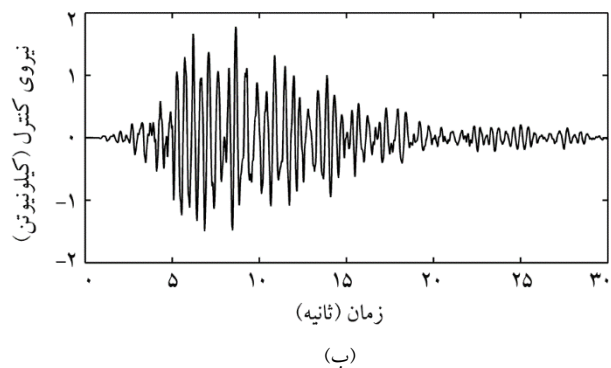
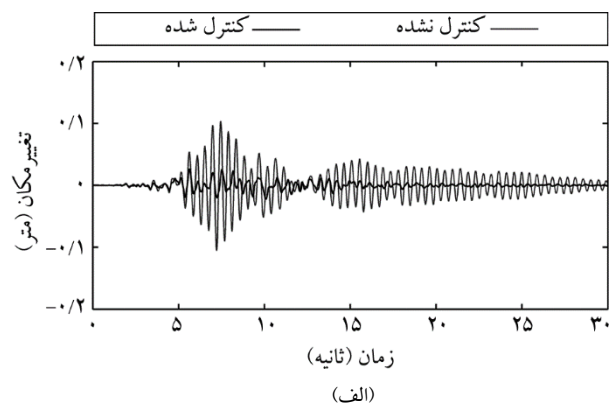
اعمال اپراتورهای فوق تا حصول شرط خاتمه‌ی الگوریتم ادامه می‌یابد. پارامترهای الگوریتم خفاش به صورت زیر مقداردهی می‌شوند.

جدول (۵): پارامترهای الگوریتم خفاش.

تعداد جمعیت اولیه (تعداد خفاش‌ها)	N_{Pop}	۳۰
تعداد تکرار ماکزیمم	N_{Iter}	۵۰
فرکانس مینیمم	f_{min}	۰
فرکانس ماکزیمم	f_{max}	۱
بلندی صوت اولیه	A_0	۰/۵
نرخ انتشار پالس اولیه	Emission Rate Pulse (r_i^0)	۰/۵
ضریب ثابت رابطه A_i	α	۰/۹
ضریب ثابت رابطه r_i	γ	۰/۹

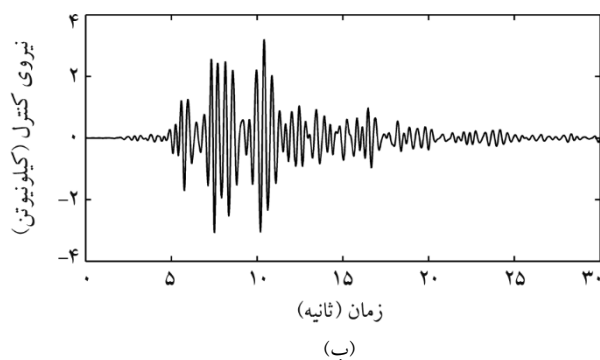
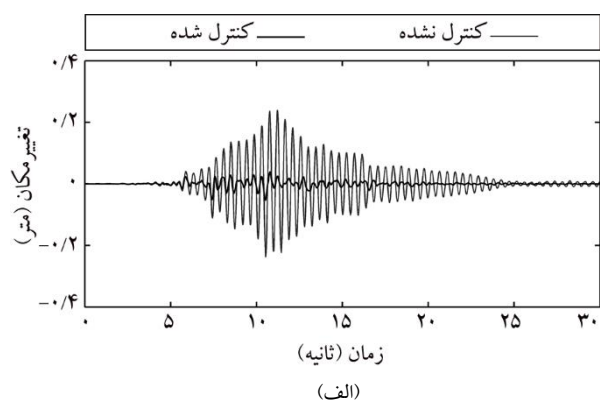
۴-۳-۱- کنترل ارتعاشات سازه‌ی نمونه با استفاده از کنترلر BA

شکل (۷) تاریخچه‌ی زمانی پاسخ‌های سازه و نیروی کنترلی مورد نیاز را تحت تحریک زلزله‌ی ۱۰ درصد در ۵۰ سال نمایش می‌دهد.



شکل (۷): نتایج کنترل مبتنی بر BA در پ سازه‌ی سه درجه آزادی تحت زلزله‌ی ۱۰ درصد در ۵۰ سال (الف) تاریخچه‌ی تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی (ب) تاریخچه‌ی نیروی کنترل طبقه‌ی فوقانی.

پاسخ‌های کنترل شده و کنترل نشدهی سازه‌ی سه درجه آزادی تحت تحریک زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال و نیروی کنترل مورد نیاز در شکل (۱۰) ارائه شده‌اند.



شکل (۱۰): نتایج کنترل مبتنی بر FA در سازه‌ی سه درجه آزادی تحت زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال (الف) تاریخچه‌ی تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی (ب) تاریخچه‌ی نیروی کنترل طبقه‌ی فوقانی.

نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از عملکرد مطلوب کنترلر FA در دستیابی به نتایج بهینه‌تر نسبت به حالت کنترل نشده است.

۴-۵- کنترل مبتنی بر الگوریتم اجسام در حال برخورد (CB)
برقراری اصل پایداری اندازه‌ی حرکت خطی در برخورد تک‌بعدی اجسام و قوانین حاکم بر این مسئله‌ی فیزیکی الهام‌بخش ارائه‌ی روش بهینه‌سازی اجسام در حال برخورد توسط کاوه و مهدوی [۲۲] در سال ۲۰۱۴ شده است. در این روش ابتدا موقعیت آغازین اجسام به صورت تصادفی در بازه‌ی مجاز تعیین می‌شود. برای هر جسم جرمی متناسب با میزان برازندگی آن تعلق می‌گیرد. سپس بر اساس جرم تعلق یافته، اجسام به دو گروه اجسام متحرک و

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta \exp[-\gamma \frac{t}{T_{ij}}] (x_j^t - x_i^t) + \alpha \varepsilon_i^t \quad (26)$$

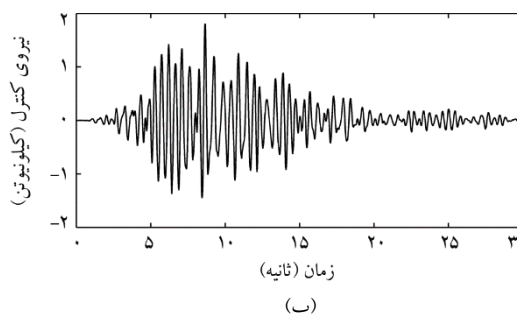
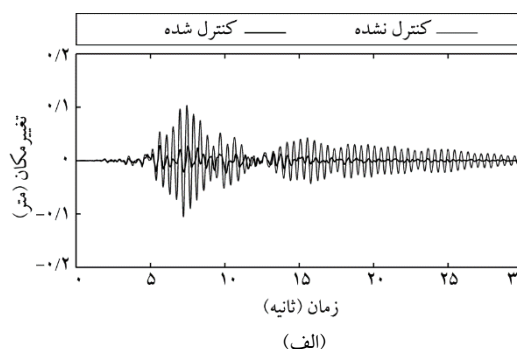
شماره‌ی تکرار الگوریتم می‌باشد. دومین جمله بر اثر جذب است و جمله‌ی تصادفی سوم الزاماً تنوع پاسخ‌ها (قابلیت پویش) را کنترل می‌نماید. T_{ij} فاصله‌ی کرم شب‌تاب i از کرم شب‌تاب j است، β ضریب جذابیت، ε بردار تصادفی، α پارامتر تصادفی ساز و γ ضریب جذب نور می‌باشد. مقادیر پارامترها در این مطالعه به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند.

جدول (۶): پارامترهای الگوریتم کرم شب‌تاب.

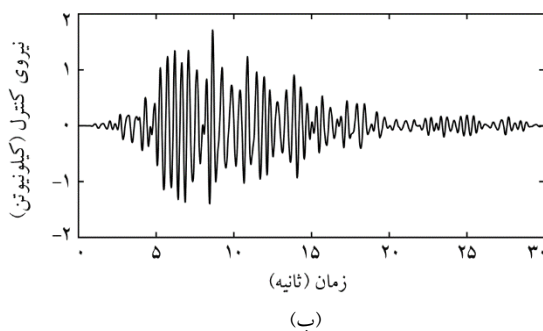
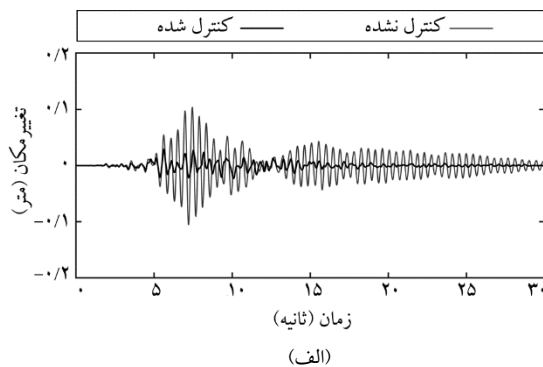
۳۰	N_{Pop}	تعداد جمعیت اولیه (تعداد کرم‌های شب‌تاب)
۵۰	N_{Iter}	تعداد تکرار ماکزیمم
۰/۵	α	پارامتر تصادفی ساز
۰/۲	β	میزان جذابیت
۱	γ	ضریب جذب نور

۴-۴-۱- کنترل ارتعاشات سازه‌ی نمونه با استفاده از کنترلر FA

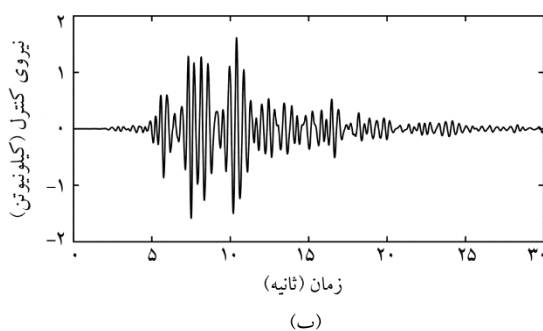
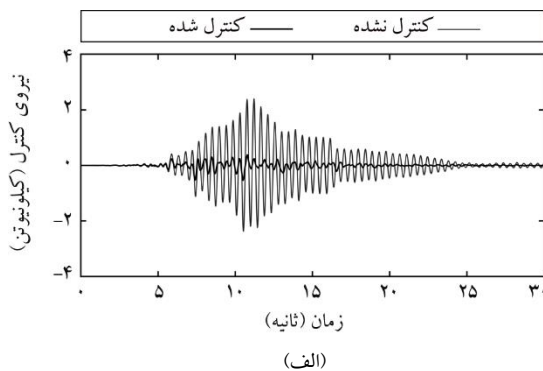
شکل (۹) نمایش پاسخ‌های کنترل شده و کنترل نشده‌ی سازه‌ی سه درجه آزادی تحت تحریک زلزله‌ی ۱۰ درصد در ۵۰ سال و نیروی کنترل مورد نیاز می‌باشد.



شکل (۹): نتایج کنترلر مبتنی بر FA در سازه‌ی سه درجه آزادی تحت زلزله‌ی ۱۰ درصد در ۵۰ سال (الف) تاریخچه‌ی تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی (ب) تاریخچه‌ی نیروی کنترل طبقه‌ی فوقانی.



شکل (۱۱): نتایج کنترل مبتنی بر CB در سازه‌ی سه درجه آزادی تحت زلزله‌ی ۱۰ درصد در ۵۰ سال (الف) تاریخچه‌ی تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی (ب) تاریخچه‌ی نیروی کنترل طبقه‌ی فوقانی.



شکل (۱۲): نتایج کنترل مبتنی بر CB در سازه‌ی سه درجه آزادی تحت زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال (الف) تاریخچه‌ی تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی (ب) تاریخچه‌ی نیروی کنترل طبقه‌ی فوقانی.

ثابت تقسیم‌بندی شده و اجسام متحرک به‌سوی اجسام ثابت طبق قوانین حاکم بر برخورد حرکت می‌نمایند و در موقعیت‌های جدید قرار می‌گیرند. ضریب استرداد^{۲۲} (توان اجسام برای بازیابی سرعت اولیه‌ی خود پس از برخورد) توسط رابطه (۲۷) به‌روزرسانی می‌شود. در روش بهینه‌سازی اجسام در حال برخورد پارامتر خاصی تعریف نشده و لذا به‌کارگیری این الگوریتم بسیار ساده است.

$$COR = 1 - \frac{iter}{max_iter} \quad (27)$$

در این رابطه، $iter$ شماره‌ی تکرار i ام و max_iter تعداد تکرار ماکزیمم است. حرکت و برخورد اجسام و تغییر موقعیت آنها تا برقراری شرایط توقف الگوریتم ادامه می‌یابد [۲۳].

جدول (۷): پارامترهای الگوریتم اجسام در حال برخورد.

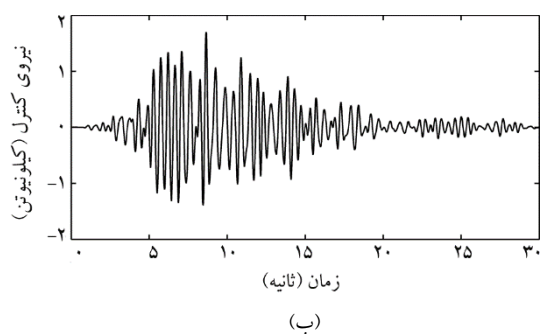
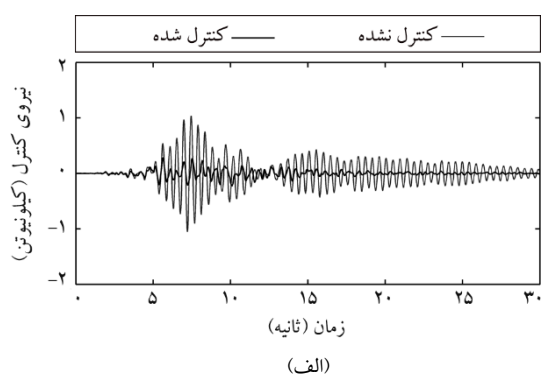
۳۰	N_{Pop}	تعداد جمعیت اولیه (تعداد اجسام)
۵۰	N_{Iter}	تعداد تکرار ماکزیمم

۴-۵-۱- کنترل ارتعاشات سازه‌ی نمونه با استفاده از کنترلر CB

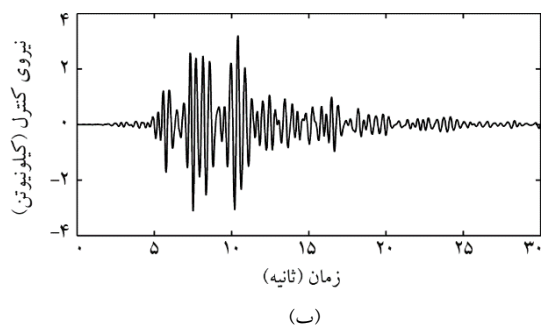
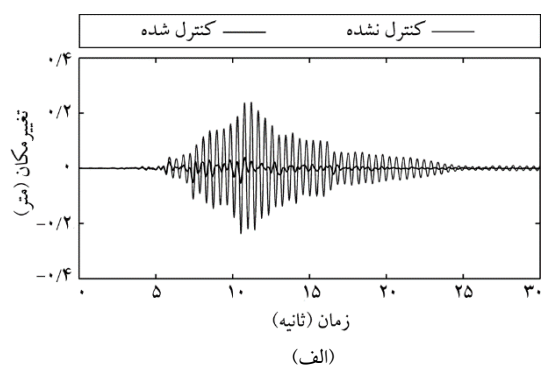
پاسخ‌های کنترل نشده و کنترل شده‌ی سازه با کنترلر CB تحت تحریک زلزله‌ی ۱۰ درصد در ۵۰ سال و ۲ درصد در ۵۰ سال به‌ترتیب در شکل (۱۱) و شکل (۱۲) ارائه شده‌اند. توانایی کنترلر CB در کاهش ارتعاشات سازه با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشهود می‌باشد.

۴-۶- کنترلر مبتنی بر الگوریتم جستجوی هارمونی (HS)

الگوریتم جستجوی هارمونی نخستین بار توسط گیم و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۰۱ معرفی شده است. این الگوریتم از جستجوی یک حالت کامل از هارمونی در تولید موسیقی الهام می‌گیرد. مشابه روند بداهه‌نوازی در یک ارکستر هر نوازنده موظف به تلاش برای در نظر گرفتن ملاحظات جهت تولید هارمونی بهتر در ارکستر می‌باشد و هارمونی در موسیقی معادل با یافتن مقدار بهینه در فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۱۳): نتایج کنترل مبتنی بر HS در سازه‌ی سه درجه آزادی تحت زلزله‌ی ۱۰ درصد در ۵۰ سال (الف) تاریخچه‌ی تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی (ب) تاریخچه‌ی نیروی کنترل طبقه‌ی فوقانی.



شکل (۱۴): نتایج کنترل مبتنی بر HS در سازه‌ی سه درجه آزادی تحت زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال (الف) تاریخچه‌ی تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی (ب) تاریخچه‌ی نیروی کنترل طبقه‌ی فوقانی.

در اجرای این الگوریتم ابتدا حافظه‌ی هارمونی با مقادیر تصادفی مقداردهی می‌شود. مطابق با نرخ انتخاب حافظه‌ی هارمونی (HMCR)^{۲۳}، انتقال هارمونی بهینه به مرحله‌ی بعدی تضمین می‌شود. در مرحله‌ی بعد که تنظیم باند (BW)^{۲۴} نامیده می‌شود یک پاسخ جدید در اطراف پاسخ بهینه‌ی x با کمک تنظیم باند و نرخ تنظیم کوک (PAR)^{۲۵} تولید می‌شود. با تولید هارمونی جدید اگر هارمونی بهتری حاصل شد حافظه‌ی هارمونی با مقادیر بهینه جایگزین می‌شود. تنظیم کوک معادل با تولید یک پاسخ متفاوت در الگوریتم HS است و مشابه عملگر جهش در الگوریتم ژنتیک گریز از بهینه‌ی محلی را کنترل می‌نماید. در عمل تنظیم کوک به صورت خطی انجام می‌گیرد که ε بردار تصادفی است.

$$x_{\text{new}} = x_{\text{old}} + BW \times \varepsilon \quad (28)$$

پارامترهای روش HS در شبیه‌سازی عددی به صورت زیر اختیار شده‌اند.

جدول (۸): پارامترهای الگوریتم جستجوی هارمونی.

۳۰	N_{Pop}	جمعیت اولیه (تعداد اعضای حافظه‌ی هارمونی)
۵۰	N_{Iter}	تعداد تکرار ماکزیمم
۰/۲	BW	تنظیم باند
۰/۹۵	HMCR	نرخ انتخاب حافظه‌ی هارمونی
۰/۳	PAR	نرخ تنظیم کوک

۴-۶-۱- کنترل ارتعاشات سازه‌ی نمونه با استفاده از کنترلر HS

پاسخ‌های کنترل شده و کنترل نشده‌ی سازه‌ی سه درجه آزادی تحت تحریک زلزله‌ی ۱۰ درصد در ۵۰ سال و نیروی کنترل مورد نیاز در شکل (۱۳) ارائه شده‌اند. شکل (۱۴) پاسخ‌های کنترل شده و کنترل نشده‌ی سازه‌ی سه درجه آزادی تحت تحریک زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال و نیروی کنترل مورد نیاز را ارائه می‌دهد.

نمودارها عملکرد بهینه‌ی کنترلر HS را نسبت به حالت کنترل نشده تأیید می‌کنند.

۴-۷- مقایسه‌ی عملکرد روش‌های فراکاوشی در طراحی کنترلر بهینه

بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها رویکرد پیشنهادی مبتنی بر موجک و روش‌های فراکاوشی عملکرد موفقیت‌آمیزی را در کنترل پاسخ‌های سازه از خود نشان داده است. انتخاب و تنظیم اتوماتیک ماتریس‌های وزنی در کنار صرفه‌جویی در زمان و پرهیز از پیچیدگی‌های محاسباتی، ویژگی‌های بهینه‌ای برای سیستم کنترلی به ارمغان آورده است. مقایسه‌ی نتایج حاصل با حالت کنترل نشده کاهش قابل توجهی را در پاسخ سازه‌ی نمونه تحت زلزله‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج حاصل از کنترلرهای فراکاوشی مورد مطالعه جهت مقایسه با روش LQR در جدول (۹) و جدول (۱۰) ارائه شده است.

در میان کنترلرهای فراکاوشی، کنترلرهای DE، CB و ICA به مقادیر بهینه‌تر شاخص عملکرد دست یافته‌اند. روش‌های FA، BA و HS در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده

کنترلرهای فراکاوشی با دستیابی به مقادیر بهینه‌تر پاسخ و نیروی کنترل نسبت به روش LQR عملکرد مطلوب‌تری از خود نشان داده‌اند.

تحت زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال، ماکزیمم تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی سازه توسط کنترلر ICA نسبت به روش LQR ۱۴ درصد و ماکزیمم نیروی کنترل ۴ درصد بهبود داشته است. ماکزیمم پاسخ سازه توسط کنترلرهای DE، CB، BA، FA و HS به ترتیب ۱۲، ۱۶، ۱۶ و ۱۵ درصد نسبت به روش LQR بهبود یافته است.

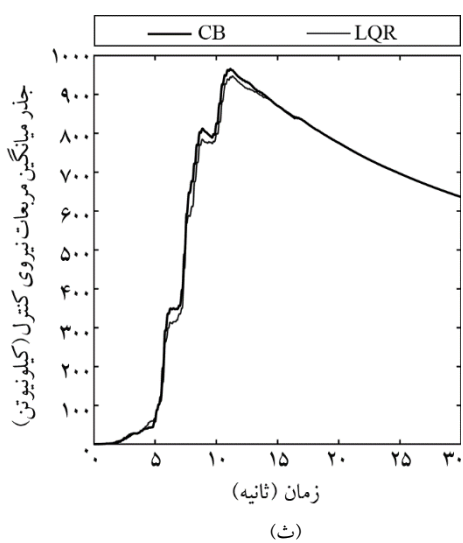
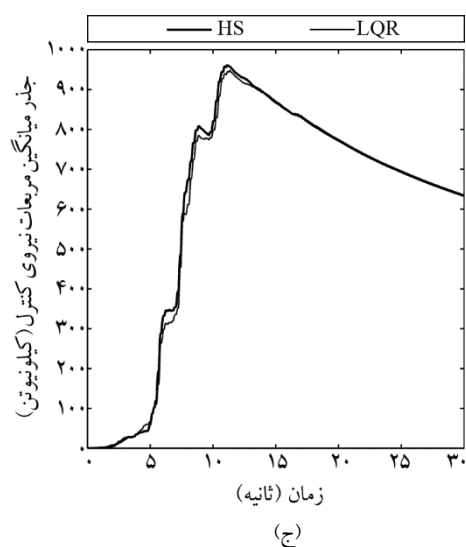
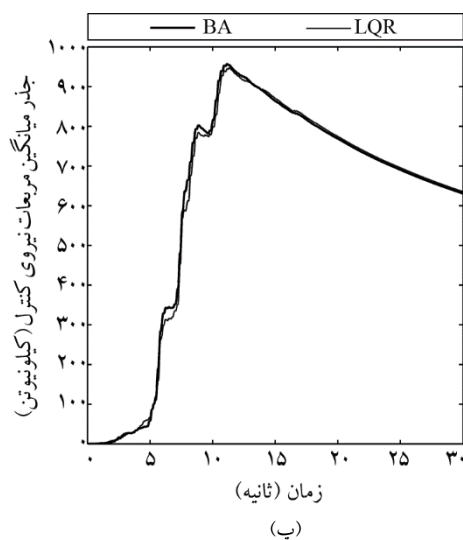
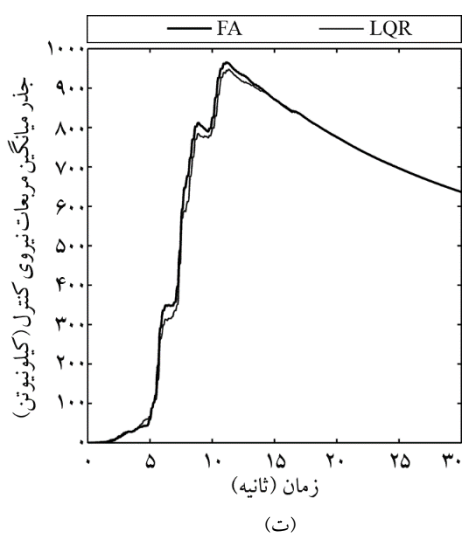
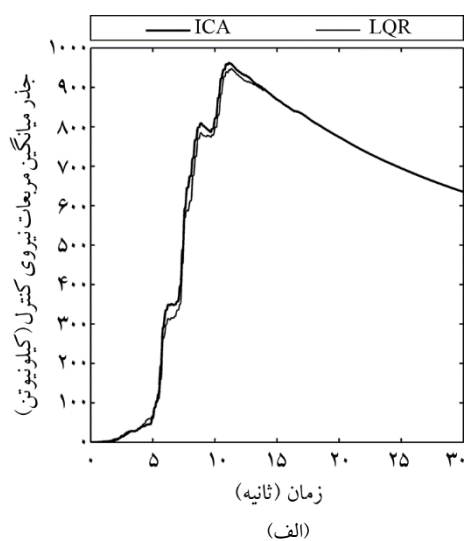
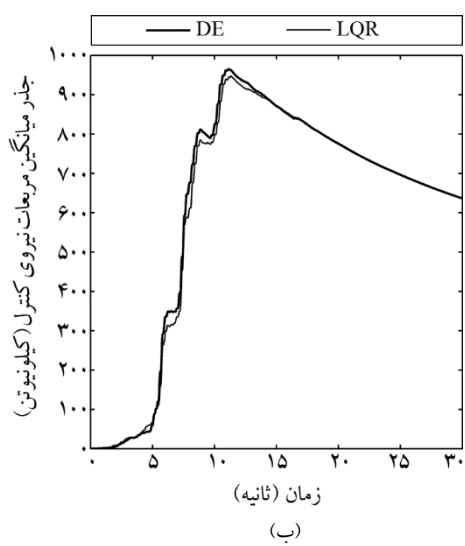
نتایج جدول (۹) و جدول (۱۰) مقایسه‌ی مقادیر ماکزیمم پاسخ‌های سازه‌ی مورد مطالعه می‌باشد. یکی دیگر از معیارهای مقایسه‌ی عملکرد کنترلرهای مبتنی بر روش‌های فراکاوشی، RMS نیروی کنترل به عنوان نماینده‌ی نیروی کنترل در طول مدت اعمال زلزله می‌باشد. نمودار RMS نیروی کنترل کنترلرهای طراحی شده در مدت اعمال زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال در شکل (۱۵) ارائه شده است.

جدول (۹): مقایسه‌ی کنترلرهای فراکاوشی و روش LQR برای سازه‌ی نمونه تحت زلزله‌ی ۱۰ درصد در ۵۰ سال.

کنترل نشده	J	ماکزیمم تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی (m)	ماکزیمم سرعت طبقه‌ی فوقانی (m/sec)	ماکزیمم شتاب طبقه‌ی فوقانی (m/sec ²)	ماکزیمم نیروی کنترل در طبقه‌ی فوقانی (kN)
کنترل نشده	-	۰/۱۰۵۱	۱/۴۴۶۹	۱۹/۸۱۹۳	-
LQR	۱/۷۴۳۹	۰/۰۲۹۵	۰/۴۱۰۷	۶/۱۸۱۷	۱/۸۷۵۰
ICA	۱/۶۶۸۰	۰/۰۲۷۶	۰/۳۱۹۸	۶/۵۸۷۱	۱/۷۲۷۲
DE	۱/۶۵۲۰	۰/۰۲۵۸	۰/۲۹۰۵	۶/۵۷۴۹	۱/۷۷۶۶
BA	۱/۶۶۸۶	۰/۰۲۶۷	۰/۳۰۸۲	۶/۵۲۹۱	۱/۷۷۹۴
FA	۱/۶۸۰۱	۰/۰۲۸۵	۰/۳۱۹۹	۶/۹۹۱۱	۱/۸۰۷۸
CB	۱/۵۹۷۰	۰/۰۲۸۸	۰/۳۲۰۱	۷/۰۳۷۶	۱/۷۰۸۴
HS	۱/۶۸۴۱	۰/۰۲۸۵	۰/۳۱۸۷	۷/۰۴۷۱	۱/۶۹۹۹

جدول (۱۰): مقایسه‌ی کنترلرهای فراکاوشی و روش LQR برای سازه‌ی نمونه تحت زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال.

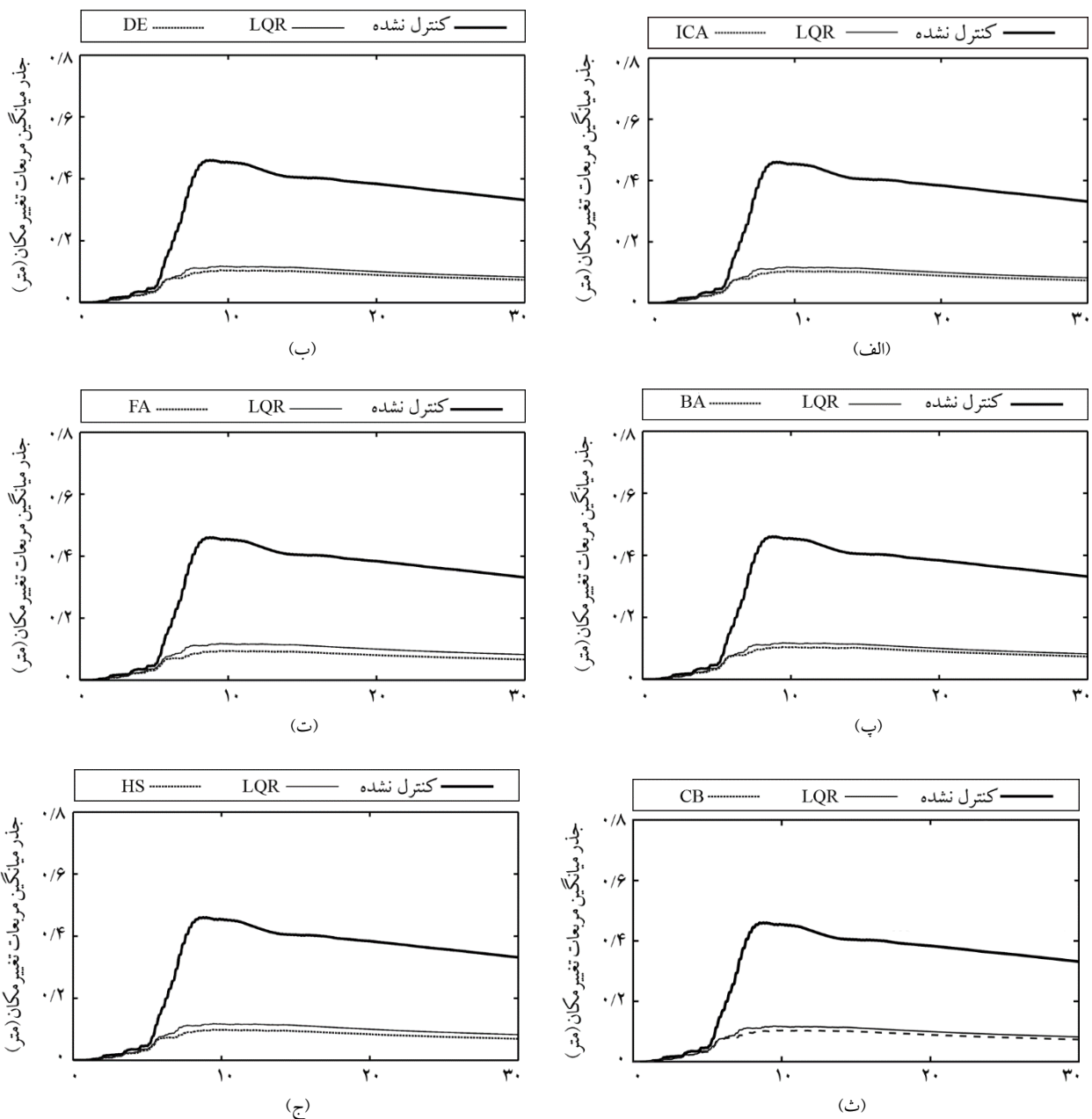
کنترل نشده	J	ماکزیمم تغییر مکان طبقه‌ی فوقانی (m)	ماکزیمم سرعت طبقه‌ی فوقانی (m/sec)	ماکزیمم شتاب طبقه‌ی فوقانی (m/sec ²)	ماکزیمم نیروی کنترل در طبقه‌ی فوقانی (kN)
کنترل نشده	-	۰/۲۳۹۸	۳/۲۸۱۵	۴۸/۱۳۷۸	-
LQR	۴/۶۸۷۰	۰/۰۶۳۳	۰/۶۹۷۸	۱۲/۶۵۴۷	۳/۲۵۰۸
ICA	۴/۰۳۶۵	۰/۰۵۴۷	۰/۶۶۹۹	۱۱/۶۴۴۲	۳/۱۳۳۵
DE	۴/۰۳۹۴	۰/۰۵۵۹	۰/۶۶۴۸	۱۲/۲۹۲۵	۳/۱۶۹۷
BA	۴/۰۳۷۵	۰/۰۵۳۵	۰/۶۶۱۰	۱۰/۷۹۳۴	۳/۲۲۲۴
FA	۴/۰۲۲۸	۰/۰۵۳۹	۰/۶۶۱۱	۱۱/۸۸۶۴	۳/۲۰۸۹
CB	۴/۰۳۲۹	۰/۰۵۴۱	۰/۶۶۸۳	۱۱/۸۳۸۰	۳/۲۲۴۷
HS	۴/۰۳۱۷	۰/۰۵۴۴	۰/۶۵۶۶	۱۱/۹۷۳۴	۳/۲۰۴۴



شکل (۱۵): مقایسه‌ی RMS نیروی کنترل کنترلرهای فراکوشی و روش LQR برای سازه‌ی سه درجه آزادی تحت زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال (الف) ICA، (ب) DE، (پ) BA، (ت) FA، (ث) CB و (ج) HS.

مکان برای کنترل‌های ICA، DE، BA، FA، CB و HS به ترتیب ۸۷، ۸۷، ۸۸، ۸۷ و ۸۹ درصد سطح زیر نمودار RMS تغییر مکان روش LQR می‌باشد که بیانگر بهبود ۱۲ درصدی پاسخ سازه نسبت به روش LQR دارد. در بین روش‌های مورد مطالعه الگوریتم‌های ICA، CB و DE عملکرد مطلوب‌تری از خود نشان داده‌اند. مقایسه‌ی شاخص‌های عملکرد نه‌گانه نیز می‌تواند اطلاعات مفیدی از عملکرد کنترلرها در اختیار قرار دهد.

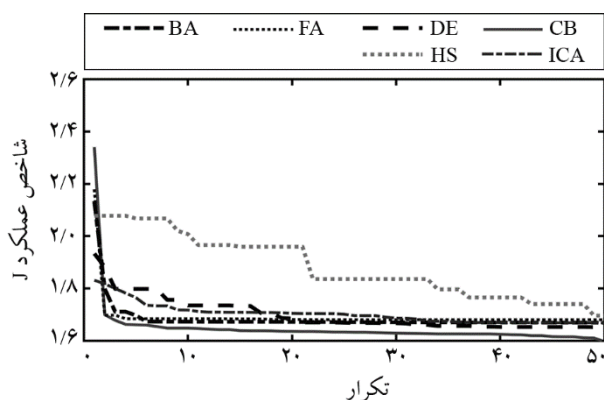
نمودار RMS تغییر مکان سازه در مدت اعمال زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال برای الگوریتم‌های مورد مطالعه در شکل (۱۶) آمده است. از نمودار شکل (۱۵) می‌توان دریافت که RMS نیروی کنترل به دست آمده توسط روش‌های فراکاوشی تقریباً برابر با انرژی کنترل مورد نیاز روش LQR می‌باشد. این در حالی است که RMS پاسخ سازه تحت همان زلزله و با همان نیروی کنترل اعمالی نسبت به روش LQR بهبود قابل قبولی داشته است. به طوری که سطح زیر نمودار RMS تغییر



شکل (۱۶): مقایسه‌ی RMS پاسخ‌های کنترل شده و کنترل نشده سازه‌ی سه درجه آزادی با کنترل‌های پیشنهادی و روش LQR تحت زلزله‌ی ۲ درصد در ۵۰ سال (الف) ICA، (ب) DE، (پ) BA، (ت) FA، (ث) CB و (ج) HS.

- روش‌های FA و BA در تکرارهای پایین به همگرایی رسیده و به‌طور تقریبی پس از تکرار سوم بهبود چشمگیری در مقدار به‌دست‌آمده توسط آنها حاصل نمی‌گردد. کنترلر ICA در تکرار ۲۰ و کنترلرهای DE، CB و HS به ترتیب در تکرارهای ۳۵، ۴۸ و ۴۸ همگرا شده‌اند.

با توجه به رفتار همگرایی الگوریتم‌های فراکاوشی مورد مطالعه،



شکل (۱۷): همگرایی شاخص J برای سازه‌ی سه درجه آزادی تحت زلزله‌ی ۱۰ درصد در ۵۰ سال.

نتایج ارائه شده در جدول (۱۱) نشان می‌دهد بیشتر شاخص‌های مبنای کنترلرهای فراکاوشی نسبت به شاخص‌های مبنای LQR بهینه‌تر می‌باشند که نشانگر عملکرد مطلوب این روش‌ها در کنترل ابعاد مختلف رفتار سازه می‌باشد. رتبه‌ی هر کنترلر در گوشه‌ی چپ خانه‌های جدول اشاره شده است. نتایج بهینه‌تر اغلب توسط کنترلرهای ICA و DE و BA کسب شده‌اند.

یکی از معیارهای مهم مقایسه‌ی الگوریتم‌های فراکاوشی روند همگرایی تابع هدف توسط این روش‌ها می‌باشد. شکل (۱۷) نمودارهای روند همگرایی شاخص عملکرد را توسط روش‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.

از مقایسه‌ی نمودار همگرایی الگوریتم‌های مورد مطالعه می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- روش بهینه‌سازی CB به بهینه‌ترین مقدار شاخص عملکرد دست یافته است. الگوریتم‌های FA، ICA، DE و HS در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند.

جدول (۱۱): نتایج شاخص‌های مبنای نه‌گانه برای سازه‌ی سه درجه آزادی تحت تحریک زلزله‌ی ۱۰ درصد در ۵۰ سال.

HS	CB	FA	BA	DE	ICA	LQR	
۰/۲۴۹۶	۰/۲۴۸۶	۰/۲۵۳۷	۰/۲۴۲۹	۰/۲۴۳۹	۰/۲۳۸۴	۰/۲۹۳۵	J _۱
۵	۴	۶	۲	۳	۱	۷	
۰/۲۵۹۷	۰/۲۶۲۳	۰/۲۶۱۱	۰/۲۴۵۲	۰/۲۳۷۵	۰/۲۵۲۱	۰/۲۸۵۱	J _۲
۴	۶	۵	۲	۱	۳	۷	
۰/۳۵۵۶	۰/۳۵۵۱	۰/۳۵۲۷	۰/۳۲۹۴	۰/۳۳۱۷	۰/۳۳۲۴	۰/۳۱۱۹	J _۳
۷	۶	۵	۲	۳	۴	۱	
۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۳۶	۰/۳۲۳۰	J _۴
۵	۱	۲	۴	۶	۳	۷	
۰/۲۵۳۱	۰/۲۵۴۳	۰/۲۵۵۰	۰/۲۴۰۳	۰/۲۳۳۳	۰/۲۴۷۸	۰/۲۷۹۲	J _۵
۴	+۵	۶	۲	۱	۳	۷	
۰/۲۲۶۰	۰/۲۲۷۴	۰/۲۲۶۵	۰/۲۱۱۳	۰/۲۰۴۹	۰/۲۱۹۲	۰/۲۵۰۸	J _۶
۴	۶	۵	۲	۱	۳	۷	
۰/۳۲۹۵	۰/۳۲۸۶	۰/۳۳۱۸	۰/۳۰۹۷	۰/۳۱۷۴	۰/۳۱۷۶	۰/۳۰۵۶	J _۷
۶	۵	۷	۲	۳	۴	۱	
۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۵	۰/۲۸۷۸	J _۸
۳	۱	۱	۳	۶	۳	۷	
۰/۰۵۷۸	۰/۰۵۸۰	۰/۰۶۱۴	۰/۰۶۰۵	۰/۰۶۰۴	۰/۰۵۸۷	۰/۰۶۳۷	J _۹
۱	۲	۶	۵	۴	۳	۷	

تکرارهای کمتری پاسخ مسئله‌ی کنترل را محاسبه می‌نمایند و در تکرارهای پایین همگرا می‌شوند. الگوریتم‌های ICA و DE، CB و HS در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. همان‌گونه که بیان شد تابع هدف بهینه‌سازی مرتبه‌ی دوم مورد استفاده موازنه‌ای بین میزان کاهش پاسخ سازه و کاهش انرژی کنترلی برقرار می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت روش‌های فراکاوشی که مقادیر بهینه‌تری برای شاخص عملکرد J به دست داده‌اند تعادلی معقول و منطقی بین کاهش پاسخ‌ها و نیروهای کنترل برقرار نموده‌اند. از این منظر بهترین الگوریتم‌ها، روش‌های CB، ICA و DE معرفی می‌شوند و الگوریتم‌های BA و FA و HS در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

نتایج ارائه شده برای کنترل فعال سازه‌ها مجدداً پتانسیل تبدیل موجک و الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی را در کنترل ارتعاش سازه‌ها نشان می‌دهد. به‌عنوان قضاوت نهایی در مورد تأثیر ۶ کنترلر هوشمند نشان داده می‌شود که بهینه‌گر CB، ICA و DE ابزارهایی بسیار قدرتمند کاهش پاسخ سازه با ملاحظه‌ی هم‌زمان چندین پارامتر دلخواه و مطلوب هستند.

مراجع

1. Datta, T. (2003) A state-of-the-art review on active control of structures. *ISET Journal of Earthquake Technology*, **40**(1), 1-17.
2. Basu, B. and Nagarajaiah, S. (2008) A wavelet-based time-varying adaptive LQR algorithm for structural control. *Engineering Structures*, **30**(9), 2470-2477.
3. Lynch, J.P. and Law, K.H. (2002) Market-based control of linear structural systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **31**(10), 1855-1877.
4. Aldemir, U., Bakioglu, M., and Akhiev, S. (2001) Optimal control of linear buildings under seismic excitations. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **30**(6), 835-851.
5. Alavinasab, A., Moharrami, H., and Khajepour, A. (2006) Active control of structures using energy-

روش‌های FA و BA می‌توانند انتخاب مناسبی برای طراحی کنترلر با پاسخ قابل قبول با کمترین هزینه از نظر زمان محاسباتی باشند. همچنین الگوریتم‌های CB، ICA و DE جهت طراحی کنترلر بهینه و دستیابی به پاسخ‌های حداقل پیشنهاد می‌گردند. نمودار همگرایی کنترلرهای CB و HS نشان می‌دهد جهت دستیابی به پاسخ‌های بهینه‌تر ۵۰ تکرار کافی نبوده و تعداد تکرار الگوریتم بهتر است افزایش یابد.

۵- نتیجه‌گیری

به‌منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، شبیه‌سازی‌هایی بر روی سازه‌ی سه درجه آزادی تحت تحریک زلزله‌های مصنوعی انجام گرفت و همان‌گونه که انتظار می‌رفت، اعمال کنترلر بهینه‌ی پیشنهادی در مقایسه با کنترلر کلاسیک LQR، علاوه بر کاهش نیروهای کنترلی مورد نیاز، موجب کاهش پاسخ‌های سازه نیز گردید. همچنین شاخص‌های پنج‌مارک نیز نسبت به روش LQR بهبود داشتند. با توجه به کاهش حداکثر پاسخ سیستم و نیروی کنترلی مورد نیاز و همچنین کاهش میانگین پاسخ‌ها (RMS) و شاخص‌های عملکرد نه‌گانه برای سازه‌ی نمونه می‌توان نتیجه گرفت تبدیل موجک و روش فراکاوشی 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.

با توجه به تعدد و تنوع روش‌های فراکاوشی ارتعاشات سازه‌های تحت مطالعه با ۶ کنترلر فراکاوشی کنترل گردید. بررسی و مقایسه‌ی عددی نتایج شبیه‌سازی‌ها تحت تحریک زلزله‌های مصنوعی عملکرد موفقیت‌آمیز بهینه‌گر فراکاوشی را در دستیابی هم‌زمان به پاسخ‌ها و انرژی کنترلر بهینه تأیید می‌نماید. نتایج و یافته‌ها نشان می‌دهد:

- از نظر تعداد تکرارهای مورد نیاز برای رسیدن به همگرایی، نتایج، همگرایی سریع‌تر را در الگوریتم‌های FA و BA نشان می‌دهد که ضمن دستیابی به پاسخ با دقت قابل قبول در تعداد

15. Rakhshani, E. (2012) Intelligent linear-quadratic optimal output feedback regulator for a deregulated automatic generation control system. *Electric Power Components and Systems*, **40**(5), 513-533.
16. Fatemi, A., Bagheri, A., Amiri, G.G., and Ghafory-Ashtiany, M. (2012) Generation of uniform hazard earthquake accelerograms and near-field ground motions. *Journal of Earthquake and Tsunami*, **6**(02).
17. Ohtori, Y., Christenson, R., Spencer Jr, B., and Dyke, S. (2004) Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings. *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(4), 366-385.
18. Atashpaz-Gargari, E. and Lucas, C. (2007) Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, IEEE: Singapore, Singapore, 4661-4667.
19. Storn, R. and Price, K. (1997) Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, **11**(4), 341-359.
20. Yang, X.-S. (2010) 'A new metaheuristic bat-inspired algorithm.' In: *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*, Springer, 65-74.
21. Yang, X.-S. (2008) 'Firefly algorithm.' In: *Nature-inspired Metaheuristic Algorithms*, Luniver Press, 79-90.
22. Kaveh, A. and Mahdavi, V. (2014) Colliding bodies optimization: a novel meta-heuristic method. *Computers & Structures*, **139**, 18-27.
23. Kaveh, A., Vaez, S.R.H., Hosseini, P., and Ezzati, E. (2018) Layout optimization of planar braced frames using modified dolphin monitoring operator. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, **62**(3), 717-731.
24. Geem, Z.W., Kim, J.H., and Loganathan, G. (2001) A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation*, **76**(2), 60-68.
5. based LQR method. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **21**(8), 605-611.
6. Liu, J. and Wang, Y. (2008) Design approach of weighting matrices for LQR based on multi-objective evolution algorithm. *2008 International Conference on Information and Automation (ICIA)*, IEEE, Changsha, China, 1188-1192.
7. Shen, P. (2014) Application of genetic algorithm optimization LQR weighting matrices Control Inverted Pendulum. *Applied Mechanics and Materials*, **543-547**, 1274-1277.
8. Joghataie, A. and 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.
9. Wang, H., Zhou, H., Wang, D., and Wen, S. (2013) Optimization of LQR controller for inverted pendulum system with artificial bee colony algorithm. *Proceedings of the 2013 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, IEEE: Louyang, China, 158-162.
10. Wang, W., Jing, Y., Yang, L., Ma, B., and Fu, Z. (2012) Weight optimization for LQG controller based on the artificial bee colony algorithm. *AASRI Procedia*, **3**, 686-693.
11. Hamidi, J. (2012) Control system design using particle swarm optimization (PSO). *International Journal of Soft Computing and Engineering*, **1**(6), 116-119.
12. Amini, F., Hazaveh, N.K., and 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**(7), 542-557.
13. Douik, A., Hend, L., and Messaoud, H. (2008) Optimised eigenstructure assignment by ant system and LQR approaches. *International Journal of Computer Science and Applications*, **5**(4), 45-56.
14. Zhang, J., Zhang, L., and Xie, J. (2011) Application of memetic algorithm in control of linear inverted pendulum. *2011 IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems (CCIS)*, IEEE: Beijing, China, 103-107.

واژه‌نامه

- 1- تنظیم کننده ی خطی مرتبه ی دوم Linear Quadratic Regulator (LQR)
- 2- کنترل مود لغزشی Sliding Mode Control (SMC)

Pole Assignment	۳- تخصیص قطب
Model Predictive Control (MPC)	۴- کنترل پیش‌بین
Genetic Algorithm (GA)	۵- الگوریتم ژنتیک
Distributed Genetic Algorithm (DGA)	۶- الگوریتم ژنتیک توزیع شده
Artificial Bee Colony (ABC)	۷- الگوریتم زنبور عسل مصنوعی
Linear Quadratic Guassian (LQG)	۸- کنترل درجه دو گاوسی
Particle Swarm Optimization (PSO)	۹- بهینه‌سازی ازدحام ذرات
Memetic Algorithm (MA)	۱۰- الگوریتم ممیتیک
Imperialist Competitive Algorithm (ICA)	۱۱- الگوریتم رقابت استعماری
Wavelet Transform	۱۲- تبدیل موجک
Differential Evolution (DE)	۱۳- تکامل تفاضلی
Bat Algorithm (BA)	۱۴- الگوریتم خفاش
Firefly Algorithm (FA)	۱۵- الگوریتم کرم شب تاب
Colliding Bodies Optimization (CBO)	۱۶- بهینه‌سازی اجسام در حال برخورد
Harmon Search (HS)	۱۷- جستجوی هارمونی
Discrete Wavelet Transform (DWT)	۱۸- تبدیل موجک گسسته
Approximation Signal	۱۹- سیگنال تقریب
Detail Signal	۲۰- سیگنال جزئیات
Exploration	۲۱- قابلیت پوشش
Coefficient of Restitution	۲۲- ضریب استرداد
Harmony Memory Considering Rate (HMCR)	۲۳- نرخ انتخاب حافظی هارمونی
Band Width (BW)	۲۴- پهنای باند
Pitch Adjusting Rate (PAR)	۲۵- نرخ تنظیم کوک

Comparison of the Performance of Metaheuristic Algorithms in Optimal Selection of LQR Weighting Matrices

Javad Katebi^{1*} and Mona Shoaee-Parchin²

1. Assistant Professor, Tabriz University, Faculty of Civil Engineering, Structural Engineering Dept., Tabriz, Iran, *Corresponding Author, email: jkatebi@tabrizu.ac.ir
2. M.Sc. of Structural Engineering, Tabriz University, Faculty of Civil Engineering, Structural Engineering Dept., Tabriz, Iran

Active control acts as an effective strategy to improve the seismic behavior of structures by calculating and applying the external forces and leads to the adaptive change in dynamic properties of the structure during the earthquake. In the LQR method as the most common control algorithm, the second-order performance index has been optimized to establish a balance between response and control force reduction. In defining the performance index, the relative importance of response reduction and control force reduction is regulated by the selection of Q and R weight matrices. Q and R are the weight matrices for the response and control forces, respectively, and their values indicate the relative importance of response or control force decrement. There is no systematic way to determine these matrices so far these weights are chosen based on trial and error and designer experience. This study has concentrated on metaheuristic algorithms in optimal active control of structures. In this paper, to facilitate the process of controller design, R and Q weighting matrices are considered as design variables and wavelet-based performance index as objective function of metaheuristic optimization. Imperialist competitive algorithm (ICA) as a socio-politically motivated algorithm, differential evolution (DE) as an evolutionary method, bat (BA) and firefly (FA) as natural-inspired algorithms, colliding bodies (CB) as physics-inspired algorithm and harmony search (HS) as music-inspired metaheuristic are used in this study to compare different aspects of metaheuristics in dealing with the optimal active control problem. Some of these metaheuristics have not been explored in control problem yet. In this study, in order to enhance the controller performance, DWT has been applied to decompose the excitation into different frequency bands. For decomposition process, signal is decomposed using Daubechies wavelet of order 10 (db10) mother wavelet in five levels. Defined wavelet-based performance index has been selected as objective function and weighting matrix elements considered as design variables of optimization process. Then, metaheuristic algorithm has been employed to search the optimum weights for each frequency band to calculate the control force in each domain. In addition to wavelet-based LQR performance index used as objective function of optimization, nine benchmark indices obtained from the results are calculated to evaluate the controller-performance by reduction of different design parameters such as interstory drift, story displacement, acceleration, base shear and needed control force compared to the uncontrolled cases. The best solution, convergence rate and computational effort of aforementioned optimization methods for a three-story structure under different artificial earthquakes have been compared. According to the results of simulations, the effectiveness of each algorithm in vibration reduction through various seismic excitations has been evaluated by numerical simulations. This formula is able to be easily performed with any metaheuristic algorithm providing the great flexibility in the active controller design. The results for active control of structures have shown the potential of wavelet and metaheuristic algorithms in vibration control for building structures depending on the user to select the appropriate algorithm or on the problem types and its requirements such as the quality of solution, convergence rate, computational effort, and consuming time. The results indicate the effective role of metaheuristic methods in reducing responses and control forces simultaneously over the LQR method. Considering total cost value, CB, ICA and DE have produced better results compared to all the mentioned algorithms. FA and BA have good convergence tendency compared to other algorithms. Each metaheuristic algorithm has advantages and disadvantages in solving active control problem, while the superiority of CB, ICA and DE over other methods in finding the optimal responses for active control problem has been shown as well.

Keywords: Active Control, Optimization, Weighting Matrices, Metaheuristic Methods, Discretization.