

به فرمان آوری قاب های دوبعدی با شبکه ی عصبی سازگار شونده

محمد رضایی پژند^{۱*}، مهدی پاینده ثانی^۲

۱- استاد، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

یکی از دغدغه‌های همیشگی مهندسان عمران، کم کردن پاسخ‌های سازه در برابر بارهای پویای ناشی از زمین لرزه، برای جلوگیری از فاجعه‌های انسانی یا زیان‌های اقتصادی سنگین بوده است. دانشمندان در دو دهه‌ی پیشین، پژوهش‌های فراوانی در این باره انجام داده‌اند. نگره‌های کنترل پیشرفته به طور گسترده و موفقیت آمیز در سامانه‌های مهندسی برق اجرا گردیده‌اند. در این سال‌ها، پژوهش‌های فراوانی درباره‌ی کاربرد این روش‌ها در مهندسی عمران، انجام شده است. در این پژوهش‌ها، بسیاری از ابزارها و فرآیندهای کنترلی برای کاهش پاسخ‌های پویای سازه به کار رفته است. کمینه کردن پاسخ سازه در برابر نوسان زمین با بهره‌جویی از دو محرک، هدف این مقاله است. رابطه‌ی میان نیروی کنترلی محرک‌ها را نویسندگان به گونه‌ای برقرار می‌کنند که نیروی وارد در مد یکم سازه صفر گردد. سپس، برای کمینه کردن پاسخ‌ها از فن بهینه‌سازی ارثی بهره‌جویی خواهد شد. ساختار کنترلی که در این مقاله به کار می‌رود، از گونه‌ی حلقه‌ی بسته است. همچنین، از شبکه‌ی عصبی سازگار شونده برای پیش‌بینی شتاب زمین بهره‌جویی می‌گردد. نویسندگان، شبکه‌ی عصبی را بر می‌گزینند که با تغییر در شمار نرون‌های لایه‌ها در هنگام زمین لرزه توانایی سازگاری با تغییر شتاب زمین را دارا باشد. برای افزایش سرعت همگرایی شبکه‌ی عصبی، وزن‌های گام پیشین برای آغاز آموزش در گام بعد به کار می‌روند. تجربه‌های عددی گسترده بر روی زمین لرزه‌ها و نیز سازه‌های فراوان، نشان می‌دهد که روش پیشنهادی بسیار موثر است. با افزایش بلندی سازه، شتاب در برخی طبقه‌ها افزایش می‌یابد ولی هم‌چنان این فن توانایی زیادی در کاهش تغییرمکان‌های نسبی سازه دارد. به سخن دیگر، کاستی فن پیشنهادی در این پژوهش را می‌توان در به فرمان آوری رفتار سازه‌های بلند دانست. بنابراین، گستره‌ی کاربرد این روش، کنترل رفتار سازه‌های کوتاه و میان مرتبه است.

کلمات کلیدی: به فرمان آوری (کنترل) سازه، شبکه‌ی عصبی سازگار شونده، شیوه‌ی ارثی بهینه‌سازی (الگوریتم ژنتیک)، پیش‌بینی شتاب زمین، حلقه‌ی بسته

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2018.95322.1287	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.95322.1287	۱۳۹۸/۰۶/۰۱	۱۳۹۷/۰۱/۲۲	۱۳۹۷/۰۱/۲۲	۱۳۹۶/۱۲/۰۱	۱۳۹۶/۰۶/۰۹
			محمد رضایی پژند	*نویسنده مسئول:	
			rezaiee@umj.ac.ir	پست الکترونیکی:	

Active Control of Plane Frames by Compatible Neural Network

Mohammad Rezaiee-Pajand^{1*}, Mahdi Payandeh Suni²

1- Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- M.Sc. Student in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ABSTRACT

Controlling the behavior of frame building is very common these days. This goal is achieved by changing the structural behaviors through applying forces to the frames. Recently, extensive studies have been carried out in the field of structural control related to the earthquakes. All studies conducted in this area can be divided into two groups. The first category is devoted to the control devices. Since accuracy and sensitivity of required equipment play an important role, some industries are trying to build better and more robust instruments. The key subject of the second group of researchers is developing new control algorithms. These approaches need some innovations. The purpose of this study is to minimize the structural response against earthquake utilizing two actuators. The purpose of this study is to minimize the structural response against earthquake utilizing two actuators. The relationship between the control forces of the actuators was so arranged that the first mode force becomes zero. In order to minimize the structural responses, the genetic algorithm was used. The controlling system, which is exploited in this paper, is a closed circle. In addition, the neural network was employed to predict the earth acceleration. The authors selected a kind of the neural network to have compatibility with earthquake acceleration variation. To achieve this, the number of the neurons in layers should be varied. The comprehensive experimental numerical results for a variety of earthquakes and structures indicated that the suggested method is very effective. However, the present study drawback is in decreasing the responses of tall frames.

ARTICLE INFO

Received: 31/08/2017

Revised: 20/02/2018

Accepted: 11/04/2018

Keywords:

Structural control,
Neural Network,
Variable neurons,
Genetic Algorithm,
Predicting earthquake
acceleration,
Closed circle,
Earthquake.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.95322.1287

*Corresponding author: Mohammad Rezaiee-Pajand
Email address: rezaiee@umj.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از دغدغه‌های همیشگی مهندسان عمران، کم کردن پاسخ‌های سازه در برابر بارهای پویای (دینامیکی) ناشی از زمین لرزه، برای جلوگیری از فاجعه‌های انسانی یا زیان‌های اقتصادی سنگین بوده است [1]. دانشمندان در دو دهه‌ی پیشین، پژوهش‌های فراوانی در این باره انجام داده‌اند. نگره‌های (نظریه‌های) کنترل پیشرفته به طور گسترده و موفقیت آمیز در سامانه‌های مهندسی برق اجرا گردیده‌اند. در این سال‌ها، پژوهش‌های فراوانی درباره‌ی کاربرد این روش‌ها در مهندسی عمران، انجام شده است. در این پژوهش‌ها، بسیاری از ابزارها و فرآیندهای کنترلی برای کاهش پاسخ‌های پویای سازه به کار رفته است [2]. شیوه‌های به فرمان آوری سازه را می‌توان در سه گروه اصلی تقسیم بندی کرد. دسته‌ی اول، راه کار کنترل نافع (غیر فعال) است. در این روش، در ساختار کنترلی هیچ ابزاری برای به وجود آوردن نیرو به کار نمی‌رود. کاستی این فن کنترلی را می‌توان ناتوانی آن در سازگاری با تغییر در شرایط بارگذاری و ویژگی‌های سازه دانست [3]. دومین گروه، روش کنترل نیمه فعال می‌باشد. ابزارهای این سامانه، نیرو به سازه وارد نکرده و تنها نیرو یا کارمایه (انرژی) را گرفته و از بین می‌برند [4]. سومین دسته، شیوه‌ی کنترل فعال سازه است. در این راه کارکنترلی، نیروی مناسب با محرک‌ها به سازه وارد می‌شود. این سامانه، توانایی سازگاری با تغییر در بارگذاری و ویژگی‌های سازه را داراست [5]. پژوهشگران، روش‌های زیادی برای کنترل فعال سازه پیشنهاد کرده‌اند. در این میان، به کارگیری شبکه‌های عصبی در ساختار کنترل، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. شبکه‌های عصبی ساختگی (مصنوعی)، از مغز انسان الهام گرفته‌اند. یک شبکه‌ی عصبی، شامل یگان‌های پردازشگر وابسته است که در یک، دو و یا سه بعد سازماندهی می‌شوند. شبکه‌های عصبی چند لایه پیش خور با توانایی آموزشی پس انتشار خطا، یکی از رایج‌ترین معماری‌های شبکه‌های عصبی هستند. اجرای این شبکه‌ها ساده و توانایی آن‌ها در شبیه سازی رفتارهای خطی و غیرخطی، بسیار زیاد است. این کار، با دارا بودن شمار نرون‌های کافی در لایه‌های مخفی انجام می‌پذیرد [6]. این شبکه‌ها توسط بیگدلی و همکارانش در کنترل رفتار سازه‌های نامنظم در برابر زمین لرزه به کار گرفته شده‌اند [7]. شبکه‌ی به کار گرفته شده در پژوهش آن‌ها از گونه‌ی پرسپترون و دارای یک لایه‌ی پنهان بود. باید افزود، شبکه‌های عصبی در فن کنترل نیمه فعال نیز بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این میان می‌توان به پژوهش‌های کرم الدین و حاجی کاظمی [8] و هن جالی و همکارانش [9]، اشاره نمود. هم چنین، ایرفان و همکارانش از شبکه‌های عصبی و روش LQR در کنترل نیمه فعال سازه بهره استفاده کردند [10]. ازبالات و همکارانش شبکه‌ی عصبی و منطق فازی را در طراحی جداساز لرزه‌ای هوشمند به کار بردند [11]. یادآوری می‌کند، پژوهش‌های آغازین کاربرد شبکه‌های عصبی چند لایه پیش خور در ساختار کنترل فعال، توسط چن و قابوسی انجام شد [12-14]. قابوسی و جغتای، این شبکه‌ی عصبی را برای کنترل لرزه‌ای سازه‌ی چند درجه آزادی در برابر زمین لرزه، آموزش دادند. آن‌ها در فرآیند آموزش شبکه از شیوه‌ی " سریع "، که تندتر از آموزش با روش پس انتشار خطا است، بهره بردند [12]. قابوسی و بنی هانی، شبکه‌ی عصبی چند لایه پیش خور را در به فرمان آوری فعال سازه‌ی ناخطی (غیر خطی) به کار گرفتند [14]. کنترل کننده‌ی عصبی، در هر دو پژوهشی قابوسی و همکارانش به صورت خارج خط و دسته‌ای آموزش می‌دید. رضایی پژند و نیکدل، از شبکه‌ی عصبی چند لایه پیش خور به صورت روی خط، در پیش بینی نیروی کنترلی مناسب بهره جویی کردند [15]. رضایی پژند و پاینده سه شیوه‌ی نو در به فرمان آوری فعال سازه پیشنهاد دادند [16]. این شیوه‌ها در کنترل رفتار سازه‌ای بیست طبقه به کار گرفته شد. ساختار کنترلی پیشنهاد شده از گونه‌ی حلقه‌ی باز بود. هم چنین، شتاب زمین لرزه با شبکه‌ی عصبی در هر گام زمانی پیش بینی می‌شد. باید آگاه بود، دقت سامانه‌های کنترل کننده‌ای که از شبکه‌ی عصبی برای شبیه سازی و پیش بینی رفتار سازه یا شتاب زمین بهره می‌برند، به میزان زیادی به معماری شبکه، شیوه و میزان آموزش آن بستگی دارد. هانگ و همکارانش، برای کنترل سازه‌ی شش طبقه شبکه‌ی عصبی چند شاخه را طراحی کردند. این شبکه، رفتار سازه در گام پسین را پیش بینی می‌کرد. این پژوهشگران، حسگرها را در طبقه‌ی یکم سازه قرار دادند و سرعت و تغییر مکان را اندازه‌گیری کردند. داده‌های شتاب زمین لرزه، سرعت و تغییر مکان سازه هر کدام به یکی از شاخه‌های شبکه‌ی عصبی، وارد می‌شد و رفتار سازه شبیه سازی می‌گردید [17]. برای افزایش سرعت آموزش شبکه‌ی عصبی، می‌توان از شبکه‌های عصبی احتمالی در کنترل سازه بهره برد [18]. هنگامی که الگوهای آموزشی زیاد هستند، با به کارگیری الگوی آموزشی LPNN¹، می‌توان سرعت شبکه‌های عصبی احتمالی را افزایش داد. در این روش با برگزیدن الگوهای آموزشی مناسب، زمان آموزش کاهش چشمگیری می‌-

¹ Lattice probabilistic neural network

یابد [19]. شیوهی کنترل فعال سازه نه تنها برای کاهش پاسخهای ساختمانها موثر بوده، بلکه کارایی این روش در بهبود کارکرد پلها نیز ثابت شده است. رایان میشل و همکارانش از این فن برای بهبود کارایی پل بزرگراه بهره بردند [20]. روش پیشنهادی این پژوهشگران ترکیبی از روشهای عددی نرم بود. آنها از شبکهی عصبی، منطق فازی و فن بهینه سازی ارثی بهره جستند. برای بررسی کارایی روش، پل بزرگراه اورنج کانتی کالیفرنیا مورد بررسی قرار گرفت.

در این مقاله، با به کارگیری شبکهی عصبی سازگار شونده در ساختار کنترل، شتاب زمین درگام پسین (بعد) پیش بینی می شود. پاسخهای سازه، ورودی شبکهی عصبی هستند. باید افزود، این سیستم کنترلی توانایی سازگاری با تغییر در ویژگیهای سازه را داراست. برای این کار شبکهی عصبی می تواند شمار نرونهای خود را به گونه ای مناسب تغییر دهد. هم چنین، در پژوهش پیش رو دو محرک برای کنترل سازه به کار می روند. نیروی مناسب کنترلی محرکها مجهولهای این فرآیند هستند. در این جا، رابطه ای میان نیروهای کنترلی محرکها به گونه ای نوشته می شود که نیروی وارد بر مد یکم سازه صفر گردد. این رابطه سبب وابسته شدن مجهولها به یکدیگر می شود. سپس، الگوریتم ژنتیک با هدف کمینه کردن شتاب طبقه ی بام به کار می رود تا یکی از مجهولها به دست آید. سازه های زیادی زیر اثر زمین لرزه های گوناگون تحلیل می شوند تا تواناییها و نیز کاستیهای رابطه سازی پیشنهاد شده آشکار گردد.

۲- رابطه سازی پیشنهادی

مد یکم (اول) سازه سهم زیادی در پاسخهای سازه دارد. بنابراین، اگر بتوان نیروی وارد به سازه در این حالت را صفر کرد، پاسخهای سازه ناچیز می شوند. در این مقاله، رابطه ای میان نیروی کنترلی وارد بر طبقه ها به گونه ای برقرار می شود که نیروی وارد در مد یکم سازه صفر گردد. برای انجام این کار، می توان برابری حرکت سازه با n درجه آزادی را به صورت زیر نوشت.

$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{p(t)\} \quad (1)$$

در این رابطه، $[m]$ ماتریس جرم، $[c]$ ماتریس میرایی و $[k]$ ماتریس سختی سازه هستند. بردار شتاب، سرعت و جابجایی طبقه ها، به ترتیب، $\{u\}$ ، $\{\dot{u}\}$ ، $\{\ddot{u}\}$ می باشند. بردار نیروهای خارجی وارد به سازه با $\{p(t)\}$ مشخص می گردد. هنگامی که سازه در برابر زمین لرزه قرار دارد، بردار نیروهای خارجی وارد بر آن به صورت زیر است.

$$\{p(t)\} = -[m][I]\ddot{u}_g \quad (2)$$

شمار درایه های بردار $\{I\}$ برابر با تعداد طبقه های سازه است. باید افزود، در سازه های بررسی شده این مقاله سقفها سخت پنداشته می شوند. از این رو همه ی درایه های این بردار، یک هستند. تحلیل مدال، دستگاه معادله ی دیفرانسیل وابسته را به n معادله ی دیفرانسیل مستقل تبدیل می کند. با انجام این کار، همه ی حالت های تغییر شکل سازه از یکدیگر جدا می شوند. سرانجام، تغییر مکان های سازه از مجموع حالتها به دست می آیند. این فرآیند با رابطه های زیر انجام می پذیرد.

$$\{u\} = [\Phi]\{y\} = \sum_{i=1}^n \{\Phi_i\}y_i(t) \quad (3)$$

$$\ddot{y}_i + 2\xi_i\omega_i\dot{y}_i + \omega_i^2 y_i = \frac{\{\Phi_i\}^T\{p(t)\}}{\{\Phi_i\}^T[m]\{\Phi_i\}} + \frac{\{\Phi_i\}^T\{f\}}{\{\Phi_i\}^T[m]\{\Phi_i\}} \quad (4)$$

در این رابطه ها، $\{f\}$ بردار نیروی کنترل، $\{\Phi_i\}$ ، i -امین مد تغییر شکل سازه و n شمار (تعداد) طبقه های سازه است. ξ_i و ω_i به ترتیب فرکانس زاویه ای طبیعی لرزه ای در مد i -ام و درصد میرایی این مود می باشند. در طبقه ای که محرک قرار دارد، درایه ی نظیر آن در بردار نیرو ناصفر است. با صفر شدن طرف راست برابری حرکت در مد یکم، رابطه ی زیر میان نیروی کنترلی محرکها به دست می آید.

$$\frac{\{\Phi_i\}^T\{p(t)\}}{\{\Phi_i\}^T[m]\{\Phi_i\}} + \frac{\{\Phi_i\}^T\{f\}}{\{\Phi_i\}^T[m]\{\Phi_i\}} = 0, \quad i = 1 \quad (5)$$

$$\{\Phi_1\}^T\{p(t)\} + \{\Phi_1\}^T\{f\} = 0 \quad (6)$$

در این مقاله، رابطه‌ی (۶)، پایه‌ی محاسبه‌ی نیروی کنترلی در هنگام زمین لرزه می‌باشد. به سخن دیگر، نیروی کنترلی در هر گام به گونه‌ای مشخص می‌شود که این رابطه برقرار شود و نیروی وارد بر مود یکم صفر شود. باید دانست، نیروی کنترلی در هر گام زمانی، متناسب است با شتاب زمین لرزه در آن لحظه و جرم طبقه‌ای که محرک در آن قرار دارد. براین پایه، می‌توان برابری زیر را برای نیروی کنترلی نوشت.

$$f_i^D(t) = \alpha_i * m_i * \ddot{u}_g(t) \quad (7)$$

در رابطه‌ی کنونی، f_i^D نیروی کنترلی طبقه‌ی i -ام، m_i جرم i -امین طبقه و \ddot{u}_g شتاب زمین لرزه است. شبکه‌ی عصبی، این مقدار را در هر گام پیش بینی می‌کند. ضریب شتاب α_i به کمک رابطه‌ی (۵) به دست می‌آید. با قرار دادن مقدار $f_i^D(t)$ از رابطه‌ی (۷) در رابطه‌ی (۶)، نتیجه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$-\{\phi_1\}^T [m] \{I\} + \{\phi_1\}^T [m] \{I_2\} = 0 \quad (8)$$

در این جا، مکان محرک ها با بردار $\{I_2\}$ مشخص می‌گردد. اگر از دو محرک برای کنترل سازه بهره جویی شود، این بردار به صورت زیر است.

$$I_2 = [0, 0, \alpha_i, \dots, \alpha_j, \dots, 0]^T \quad (9)$$

در این رابطه‌ها، زیر نویس‌های i و j نشان دهنده‌ی طبقه‌هایی هستند که محرک در آن قرار گرفته است. باید افزود، رابطه‌ی (۸)، ضریب‌های α_i و α_j را به هم پیوند می‌دهد.

۳- تحلیل پویای سازه

روش نیومارک-بتا، برای حل معادله‌ی دیفرانسیل حرکت سازه به کار گرفته شد. این برابری در هر گام زمانی حل می‌گردد. با داشتن پاسخ‌های سازه در هر گام، نیروی کنترلی در گام پسین در دسترس قرار می‌گیرد. در سال ۱۹۵۹، نیومارک، یک دسته روش‌های گام زمانی را بر پایه‌ی برابری‌های زیر پیشنهاد کرد [۲۱].

$$\dot{u}_{j+1} = \dot{u}_j + [(1 - \gamma)\Delta t] \ddot{u}_j + (\gamma \Delta t) \ddot{u}_{j+1} \quad (10)$$

$$u_{j+1} = u_j + \Delta t \dot{u}_j + [(0.5 - \beta)\Delta t^2] \ddot{u}_j + (\beta \Delta t^2) \ddot{u}_{j+1} \quad (11)$$

در رابطه‌های کنونی، u_{j+1} و \dot{u}_{j+1} به ترتیب، شتاب، تغییر مکان و سرعت طبقه‌های سازه هستند. طول ثابت بازه‌ی زمانی Δt است. عامل‌های γ و β ، تغییرهای شتاب در یک گام زمانی و ویژگی‌های پایداری و دقت روش را مشخص می‌کنند. با فرض تغییرهای خطی شتاب در هر گام زمانی، برای γ و β ، به ترتیب، مقدارهای $1/2$ و $1/6$ به کار می‌روند. معادله‌های (۱۰) و (۱۱) و معادله‌ی حرکت سازه، در پایان هر گام زمانی، پایه‌ی محاسبه‌ی u_{j+1} و \dot{u}_{j+1} ، در زمان $i+1$ از u_j و \dot{u}_j هستند. برای کامل شدن تحلیل، تکرار لازم است. زیرا، \ddot{u}_{j+1} در طرف راست معادله‌های (۱۰) و (۱۱)، وجود دارد. در این مقاله، رفتار قاب خطی پنداشته می‌شود. در سامانه‌های خطی، می‌توان رابطه‌ی اصلی نیومارک را ساده کرد تا نیاز به تکرار نباشد. این کار با به کارگیری تغییر کمیت‌ها و به صورت زیر انجام می‌شود.

$$\Delta u_i = u_{i+1} - u_i \quad (12)$$

$$\Delta \dot{u}_i = \dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i \quad (13)$$

$$\Delta \ddot{u}_i = \ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i \quad (14)$$

$$\Delta p_i = p_{i+1} - p_i \quad (15)$$

در رابطه‌های کنونی، Δu_i تغییر جابجایی، $\Delta \dot{u}_i$ تغییر سرعت، $\Delta \ddot{u}_i$ تغییر شتاب و Δp_i تغییر نیرو در i -امین گام زمانی است. با بهره جستن از این رابطه‌ها، می‌توان پیوندهای (۱۰) و (۱۱) و معادله‌ی حرکت سازه را به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\Delta \ddot{u}_i = \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \right) \Delta u_i - \left(\frac{1}{\beta \Delta t} \right) \dot{u}_i - \left(\frac{1}{2\beta} \right) \ddot{u}_i \quad (16)$$

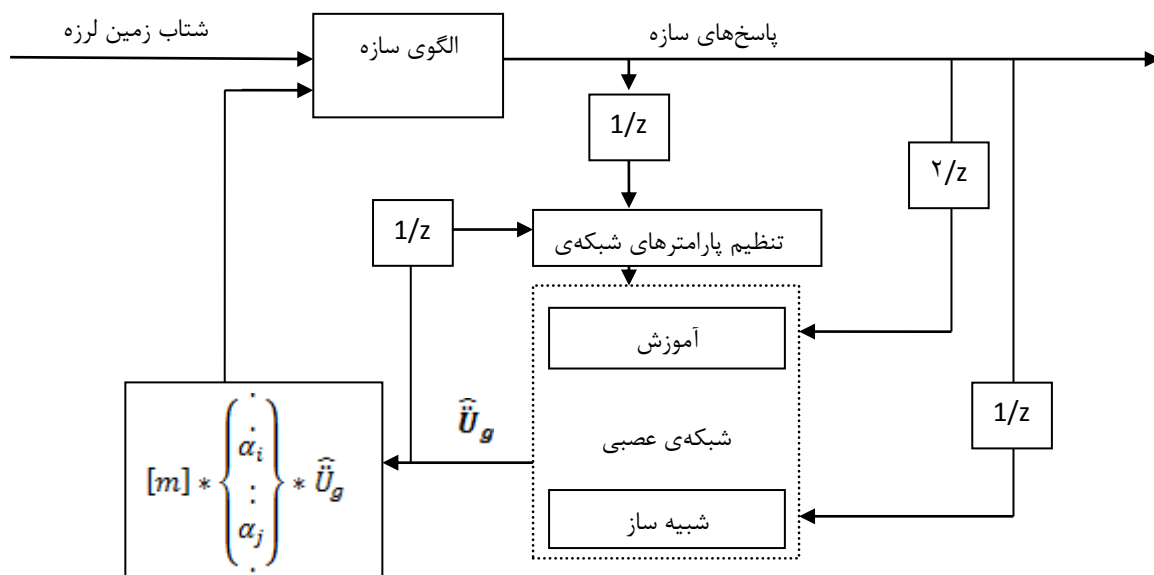
$$\Delta \dot{u}_i = \left(\frac{\gamma}{\beta \Delta t} \right) \Delta u_i - \left(\frac{\gamma}{\beta} \right) \dot{u}_i - \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{u}_i \quad (17)$$

$$m \Delta \ddot{u}_i + c \Delta \dot{u}_i + k \Delta u_i = \Delta p_i \quad (18)$$

با این رابطه‌ها در هر گام زمانی، تغییرهای پاسخ سازه به دست می‌آیند. با در دست داشتن پاسخ‌های سازه در آغاز گام زمانی، مقدارهای آن‌ها در پایان گام پیدا خواهند شد.

۴- ساختار کنترلی

ساختار کنترلی پیشنهادی، همانند شکل (۱) می‌باشد. تاریخچه‌ی پاسخ‌های سازه و زمین لرزه در گام‌های پیش مبنای محاسبه‌ی نیروی مناسب کنترلی در گام پسین است. با در دسترس بودن پاسخ‌های سازه در گام پیش و شتاب زمین لرزه در گام کنونی، شبکه‌ی عصبی آموزش می‌بیند. شتاب کنونی زمین لرزه اندازه‌گیری می‌شود و این مقدار هدف آموزشی شبکه‌ی عصبی است. با آموزش مناسب شبکه‌ی عصبی، این شبکه توانایی این را پیدا می‌کند که با وارد شدن پاسخ‌های سازه در گام کنونی، شتاب زمین لرزه در گام بعد را پیش بینی نماید.



شکل ۱: نمودار ساختار کنترلی

شکل (۱) تاخیر زمانی $1/z$ را نشان می‌دهد. پس از ویرایش ویژگی‌های شبکه‌ی عصبی، این شبکه آموزش می‌بیند و شتاب زمین لرزه پیش بینی می‌شود. شرح چگونگی ویرایش ویژگی‌های این شبکه در بخش شبکه‌ی عصبی این مقاله می‌آید. سپس، شتاب پیش بینی شده به جعبه‌ی محاسبه‌ی نیروی کنترلی می‌رود. به دنبال آن، رابطه‌ی (۷) برای محاسبه‌ی نیروی کنترلی به کار می‌رود. از نیروی کنترلی برای به فرمان‌آوری رفتار سازه بهره جویی خواهد شد. چگونگی وارد شدن نیرو به سازه را نمودار نشان می‌دهد. سپس، تحلیل دینامیکی انجام می‌شود و پاسخ‌های سازه به دست می‌آیند.

۵- شبکه‌ی عصبی

شبکه‌ی عصبی برای پیش بینی شتاب زمین لرزه به کار رفته است. آموخته‌ها در ماتریس‌های وزن، که رابط نرون‌های لایه‌ها هستند، انباشته می‌شوند. برای آموزش شبکه‌ی عصبی، روش مارکوارت-لونبرگ به کار می‌رود. این فن که همگرایی زیادی دارد، یکی از رایج ترین و موثرترین فرآیندها در آموزش شبکه‌های عصبی است. نرون‌ها، یگان‌های (واحد‌های) پردازش گر هستند که در لایه‌ها قرار دارند. هر شبکه‌ی عصبی از لایه‌ی درون‌داد (ورودی)، پنهان (مخفی) و برون‌داد (خروجی) تشکیل شده است. شمار لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌های هر لایه با توجه به قیدهای مساله، مشخص می‌شوند. آموزش شبکه‌ی عصبی به صورت بر خط در هر گام، انجام می‌گیرد. پاسخ‌های سازه در گام پیشین ورودی شبکه را تشکیل می‌دهند. شبکه‌ی عصبی با هدف پیش بینی شتاب کنونی زمین لرزه، آموزش می‌بیند. با وارد شدن پاسخ‌های کنونی سازه به شبکه، شتاب زمین لرزه در گام پسین شبیه سازی خواهد شد. در گام نخست، برای یافتن وزن‌های شبکه‌ی عصبی از تابع انتخاب تصادفی، بهره جویی می‌شود. با آموزش شبکه، این وزن ها ویرایش می‌گردند. برای افزایش سرعت همگرایی شبکه‌ی عصبی، در گام پسین، وزن‌های گام پیشین برای آغاز آموزش به کار می‌روند. در صورت نیاز، شبکه‌ی عصبی شمار نرون‌های لایه‌های خود را افزایش می‌دهد. با این کار، این شبکه می‌تواند هر زمین لرزه‌ای را پیش بینی کند.

۵-۱- شبکه‌ی عصبی مناسب

برای دستیابی به شبکه‌ی عصبی مناسب، چندین شبکه با شمار نرون‌ها و لایه‌های مختلف، بررسی شدند. درون‌داد شبکه‌ی عصبی پاسخ‌های سازه و برون‌داد آن شتاب پیش بینی شده‌ی زمین لرزه است. برای ارزیابی کارکرد شبکه‌ی عصبی، مجموع قدرمطلق خطا در گام-های زمانی محاسبه می‌شود.

$$E = \sum |\ddot{u}_g(i) - \hat{\ddot{u}}_g(i)| \quad (19)$$

در این رابطه، E مقدار خطا است. آشکار است، هر چه این مقدار کمتر باشد، شبکه کارکرد مناسب‌تری دارد. برای یافتن شبکه‌ی مناسب، از داده‌های شتاب نگاشت زمین لرزه‌ی السنترو بهره جویی شد و با روش آزمون و خطا شبکه‌ی مناسب، مشخص گردید. در جدول (۱)، ویژگی‌ها و مقدار خطا برای چند شبکه‌ی عصبی بررسی شده می‌آید.

جدول ۱: آزمون و خطا برای دستیابی به شبکه‌ی عصبی مناسب

	شمار نرون‌های هر لایه در آغاز تحلیل	E
۱	25-15-10-10-10-1	153.57
۲	25-15-10-10-10-7-7-1	138.66
۳	25-15-10-10-10-9-9-1	131.62

در این جدول، u_i نشان دهنده‌ی تغییر مکان طبقه‌ی i-ام می‌باشد. داده‌های جدول برای سازه‌ی پنج طبقه که زیر اثر زمین لرزه-ی السنترو می‌باشد، به دست آمده‌اند. این جدول نشان می‌دهد که با افزایش شمار نرون‌ها، کارکرد شبکه‌ی عصبی بهبود می‌یابد. در صورت نیاز، شمار نرون لایه‌هایی که زیر آن‌ها خط کشیده شده است، تغییر می‌کند. بیشینه‌ی نرون‌های افزایشی در این دو لایه ۵۰ نرون می‌باشد. شرط افزایش این است که تفاوت میان شتاب پیش بینی شده و واقعی زمین لرزه بیش از ۰,۴۵ باشد. از سوی دیگر، کار با نرون‌های زیاد هزینه‌ی زمانی بالایی دارد. از این رو، هنگامی که اختلاف میان شتاب پیش بینی شده و واقعی زمین لرزه کمتر از ۰,۱ و شمار نرون‌ها بیش از مقدارهای آغازین تحلیل باشد، شبکه‌ی عصبی شمار نرون‌ها را یکی کاهش می‌دهد. با انجام این کار، این شبکه می‌تواند در پیش بینی هر زمین لرزه‌ای کارکرد مناسب نشان دهد و با هر مقدار تغییر در شتاب زمین سازگار گردد. در هر گام زمانی که خطا از مقدار هدف فراتر رود، به شمار نرون لایه یکی افزوده می‌شود. برای هر شبکه‌ی عصبی این عدد با آزمون و خطا به دست می‌آید. ممکن است که خطای ایجاد شده، در اثر گرفتار شدن شبکه در نقطه‌های کمینه‌ی محلی باشد. چون وزن‌های کنونی برای آغاز آموزش شبکه‌ی عصبی در گام بعد به کار

می‌روند، شاید دوباره شبکه‌ی عصبی در نقطه‌ی کمینه‌ی محلی گرفتار گردد. با افزایش شمار نرون‌ها در گام پسین، این خطا از بین می‌رود. از سوی دیگر، این شبکه توانایی سازگاری با افزایش شمار داده‌های ورودی را دارد. بنابراین، از این شبکه می‌توان در کنترل سازه‌های بلندتر نیز بهره جست. عامل ϵ ، خطا در هر گام زمانی است. این عامل در ورودی شبکه‌ی عصبی به همراه تغییر مکان‌های سازه وارد می‌شود. جدول (۲)، نشان می‌دهد که خطا در این حالت، کاهش قابل توجهی دارد.

جدول ۲: کارکرد شبکه‌ی عصبی با افزودن خطای گام پیشین به ورودی شبکه‌ی عصبی

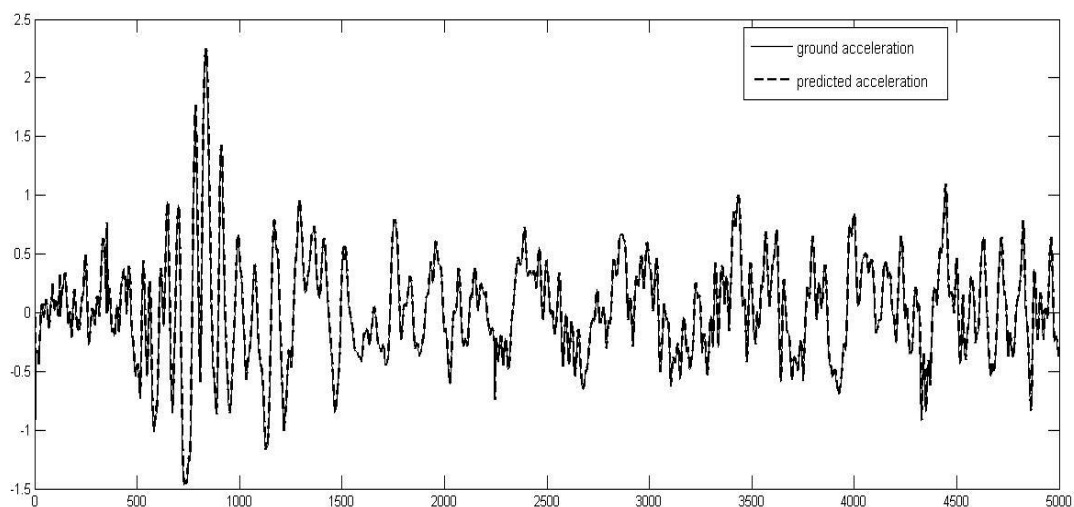
	داده به شبکه‌ی عصبی	شمار نرون‌های هر لایه در آغاز تحلیل	E
۱	$[u_1^k, u_2^k, u_3^k, u_4^k, u_5^k, \epsilon^k]^T$	25-15-10-10-10-9-9-1	109.69
۲	$[u_1^k, u_2^k, u_3^k, u_4^k, u_5^k, \epsilon^k]^T$	15-15-10-10-10-8-5-1	107.31
۳	$[u_1^k, u_2^k, u_3^k, u_4^k, u_5^k, \epsilon^k]^T$	18-18-18-18-16-16-14-14-9-1	100.31

در این مقاله، شبکه‌ی عصبی ردیف سوم جدول (۲)، در ساختار کنترلی به کار می‌رود.

$$f = NN(\{input\ parameters\}; \{NN\ architecture\}, \{sampling\ period\}) \quad (20)$$

$$\hat{u}_g^{k+1} = NN(\{u_1^k, u_2^k, u_3^k, u_4^k, u_5^k, \epsilon^k\}, \{n_1, n_2, 18, 18, 16, 16, 14, 14, 9, 1\}, \{.005\}) \quad (21)$$

شمار نرون‌های آغازین در لایه‌های یکم و دوم، به ترتیب، با n_2, n_1 مشخص شده‌اند. مقدار تاخیر زمانی، 0.005 ثانیه است. تابع لایه‌های پنهان، سیگموئید و تابع لایه‌ی ورودی خطی می‌باشد. شکل (۲)، کارکرد مناسب این شبکه را در پیش بینی شتاب زمین لرزه، در 25 ثانیه‌ی آغازین زمین لرزه‌ی السنترو نشان می‌دهد. آشکار است، هر چه شبکه‌ی عصبی توانایی بیشتری در پیش بینی شتاب زمین لرزه داشته باشد، نتیجه‌ی بهتری در کنترل سازه به دست خواهد آمد.



شکل ۲: شتاب پیش بینی شده و واقعی زمین لرزه السنترو

۶- نمونه‌های عددی

برای نشان دادن توانایی‌ها و کاستی‌های رابطه‌ی سازی پیشنهاد شده، زمین لرزه‌های فراوانی به کار می‌روند. هم چنین، از قاب کوتاه سه طبقه تا سازه‌های میان ارتفاع در تحلیل‌های عددی بهره جویی خواهد شد. برای اجرایی شدن این روش، باید از دیدگاه اقتصادی کاربرد محرک‌ها در سازه‌ی مورد نظر بررسی گردد. آشکار است که کاربرد دو محرک در سازه‌ی سه طبقه از دیدگاه اقتصادی توجیهی

ندارد. ولی در این مقاله برای بررسی چگونگی تغییر پاسخها با توجه به بلندی سازه، این کار انجام شده است. هم چنین، با این کار گسترده-ی کاربرد این روش آشکار خواهد شد.

۶-۱- ارزیابی روش در کنترل سازه سه طبقه

برای ارزیابی شیوهی پیشنهادی در کنترل سازهها، نخست یک قاب سه طبقه تحلیل می‌گردد [۱۵]. سقفهای این سازه را صلب پنداشته اند. بنابراین، قاب سه درجه آزادی دارد. اگر یکاهای جرم، سختی، میرایی و بسامد زاویه ای، به ترتیب، کیلونیوتن مجذور ثانیه بر متر، کیلونیوتن بر متر، کیلونیوتن ثانیه بر متر و هرتز باشند، ویژگیهای سازه به قرار زیر است.

$$[m] = \begin{bmatrix} 31.285 & 0 & 0 \\ 0 & 31.285 & 0 \\ 0 & 0 & 31.285 \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 87424.6 & -52346.4 & 11771 \\ -52346.4 & 96368.7 & -51810.1 \\ 11771 & -51810.1 & 42525.1 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 12.207 & -1.827 & 1.966 \\ -1.827 & 14.57 & -0.088 \\ 1.966 & -0.088 & 13.95 \end{bmatrix}$$

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} 0.262 & 0.743 & 0.583 \\ 0.568 & 0.373 & -0.728 \\ 0.78 & -0.555 & .36 \end{bmatrix}, \quad [\omega] = \begin{bmatrix} 2.24 \\ 6.83 \\ 11.5 \end{bmatrix}$$

برای کنترل این سازه، از دو محرک بهره جویی می‌گردد. در این حالت، رابطه‌ی (۶) را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد.

$$-\{\phi_{11}, \phi_{12}, \phi_{13}\} * [m] * \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + \{\phi_{11}, \phi_{12}, \phi_{13}\} * [m] * \begin{Bmatrix} \dot{\alpha}_i \\ \vdots \\ \alpha_j \end{Bmatrix} = 0 \quad (22)$$

آشکار است، رابطه‌ی میان نیروی کنترلی محرکها، به مکان قرارگیری آنها در ارتفاع سازه بستگی دارد. یک محرک در طبقه‌ی سوم قرار داده می‌شود. مکان دیگری، به گونه‌ای برگزیده می‌شود که پاسخهای سازه کمینه گردند. جدول (۳)، رابطه‌ی میان نیروی محرکها در مکانهای قرارگیری مختلف محرک را نشان می‌دهد. باید افزود، برای آفرینش نیروی کنترلی می‌توان از محرکهای هیدرولیکی بهره برد. این محرکها می‌توانند نیرویی با اندازه‌ی 10^8 نیوتن ایجاد کنند [۲۲ و ۲۳].

جدول ۳: رابطه‌ی میان نیروی محرکها در طبقه‌های مختلف

مکان محرک	بردار I_2	رابطه میان نیروهای کنترلی
محرک در طبقه یکم و سوم	$I_2 = [a_1, 0, a_2]^T$	$a_1 = 6.145 - 2.9771 * a_2$
محرک در طبقه دوم و سوم	$I_2 = [0, a_2, a_2]^T$	$a_2 = 2.834 - 1.3732 * a_2$

در مکانهای مختلف قرارگیری محرک، ضریب شتاب طبقه‌ی سوم به گونه‌ای حساب می‌شود که شتاب سازه در طبقه‌ی بام کمینه گردد. برای بهینه سازی پاسخها، از شیوه‌ی ارثی بهره جویی می‌شود. در این فرآیند، شمار عضوهای جمعیت ۴۰، احتمال پیوند خوردن ۰.۵، و احتمال جهش ۰.۰۰۱۵ به کار می‌روند که با روش آمون و خطا در دسترس قرار می‌گیرند. هم چنین، کمترین شمار تکرار ۱۵ و شرط پایان یافتن تحلیل، برابری بهترین پاسخ در ۵ نسل پیاپی است. برای یافتن ضریب شتاب طبقه‌ی سوم، سازه زیر اثر زمین لرزه-

های هچینوهه و کوبه، که به ترتیب، میدان دور و نزدیک هستند، قرار می‌گیرد. به کمک این فن و با هدف کمینه نمودن شتاب، ضریب شتاب مناسب به دست می‌آید. تابع هدف زیر در این قاب به کار می‌رود.

(۲۳)

$$j = \min(\max |u_3^*(t)|)$$

در این رابطه، j تابع کمینه شدن شتاب و $u_3^*(t)$ شتاب در طبقه‌ی سوم سازه است. با این شیوه می‌توان بهترین مکان قرارگیری محرک‌ها برای کمینه کردن شتاب طبقه‌ی بام را مشخص کرد. برای یافتن مناسب ترین ضریب شتاب، فرض می‌شود که شبکه‌ی عصبی بتواند شتاب زمین را به طور دقیق پیش بینی کند. این شرط برای از میان بردن خطای ناشی از پیش بینی نادرست شبکه‌ی عصبی به کار می‌رود. بر پایه‌ی رابطه ارائه شده، ضریب شتاب و شتاب طبقه‌ی بام سازه همانند جدول (۴) به دست می‌آید.

جدول ۴: مناسب ترین ضریب شتاب در مکان‌های مختلف قرارگیری محرک‌ها

زمین لرزه	مکان محرک	ضریب شتاب	شتاب طبقه‌ی بام (متر بر مجذور ثانیه)
Kobe	1و3	1.44	4.063
	2و3	0.752	4.6077
Hachinohe	1و3	1.479	1.2298
	2و3	0.356	1.6535

جدول (۴) نشان می‌دهد، هنگامی که محرک در طبقه‌ی یکم و سوم قرار دارد، شتاب طبقه‌ی بام کمینه است. بنابراین، مکان مناسب محرک‌ها در این سازه طبقه‌ی یکم و سوم خواهد بود. در این حالت، مقدار ضریب‌های شتاب برای هر دو زمین لرزه به هم نزدیک است و می‌توان از ضریب شتاب میانگین در کنترل سازه بهره جست.

(۲۴)

$$\alpha_{avg} = 1.4595$$

با به کارگیری ساختار کنترلی شکل (۱)، تحلیل سازه زیر اثر زمین لرزه‌های السنترو، هچینوهه، کوبه و نورتریج انجام می‌پذیرفت. جدول (۵) پاسخ‌های سازه به این زمین لرزه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۵: پاسخ‌های قاب سه طبقه با بهره جویی از ضریب شتاب میانگین در ساختار کنترل

زمین لرزه	طبقه	کنترل نشده		کنترل شده با شبکه‌ی عصبی		درصد کاهش پاسخ سازه	
		تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)
Northridge	1	0.062601	18.5583	0.00637	15.0649	89.82	18.82
	2	0.077169	27.9088	0.011315	20.0416	85.33	28.18
	3	0.035229	33.5687	0.00859	12.2432	75.61	63.52
Kobe	1	0.081233	18.0992	0.005961	6.497	92.66	64.10
	2	0.097791	35.3108	0.008177	8.5832	91.63	75.69
	3	0.051091	47.1684	0.004253	4.8597	91.67	89.69
Elcentro	1	0.02964	8.5814	0.003004	8.4444	89.86	1.59
	2	0.03063	13.2931	0.005506	10.4844	82.02	21.12
	3	0.015288	13.4225	0.004028	6.1677	73.65	54.04
Hachinohe	1	0.015955	3.9998	0.001241	2.1618	92.22	45.95
	2	0.01962	6.2722	0.002206	2.8407	88.75	54.70
	3	0.010557	9.473	0.001609	1.7862	84.75	81.14

ضریب شتاب میانگین، هنگامی که سازه زیر اثر زمین لرزه‌های هچینوهه و کوبه قرار دارد، به دست آمد. پاسخ‌های این تحلیل نشان می‌دهد که ضریب شتاب میانگین در کنترل سازه در برابر زمین لرزه‌های نورتریج و السنترو نیز کارکرد مناسبی دارد. خاطر نشان می‌کند، ضریب شتاب میانگین با هدف کمینه کردن شتاب طبقه‌ی بام به دست آمد، با وجود این، دارای توانایی زیادی در کم کردن جابجایی‌های قاب است. به گونه‌ای که در زمین لرزه‌ی نورتریج مقدار بیشینه‌ی جابه‌جایی بام سازه، ۷۵ درصد کاهش داشته است. این مقدار برای زمین لرزه‌ی السنترو نیز دارای ۷۳ درصد کاهش می‌باشد. برای نشان دادن توانایی‌های این روش در کنترل سازه‌ها، در ادامه‌ی از این شیوه برای کنترل چندین قاب با ارتفاع‌های مختلف بهره جویی خواهد شد.

۶-۲- ارزیابی روش در کنترل سازه‌ی چهار طبقه

این نمونه‌ی عددی به کنترل قاب چهار طبقه می‌پردازد. جرم، سختی و میرایی همه‌ی طبقه‌ها، به ترتیب، ۵,۵۸ کیلونیوتن مجذور ثانیه بر متر، ۱۰۸۸۳,۳ کیلو نیوتن بر متر و ۲۷,۳۲ کیلو نیوتن ثانیه بر متر است. همانند نمونه‌ی عددی پیشین، سازه تحت تاثیر شتاب نگاشت زمین لرزه‌های هچینوهه و کوبه قرار می‌گیرد. در این حالت، با هدف کمینه کردن شتاب طبقه‌ی بام، مکان مناسب محرک‌ها، ضریب شتاب و شتاب طبقه‌ی چهارم حساب می‌شوند.

جدول ۶: مناسب ترین ضریب شتاب در مکان‌های مختلف قرارگیری محرک‌ها

زمین لرزه	مکان محرک	ضریب شتاب	شتاب طبقه‌ی بام (متر بر مجذور ثانیه)
Kobe	1,4	1.957	2.0715
	2,4	1.337	0.5502
	3,4	0.51	2.8142
Hachinohe	1,4	1.92	0.6219
	2,4	1.322	0.1535
	3,4	0	0.8531

با دقت در جدول (۶)، می‌توان دریافت که بهترین مکان برای محرک‌ها در طبقه‌های دوم و چهارم است. زیرا، در این مکان‌ها تابع هدف کمینه می‌گردد. ضریب شتاب میانگین در این مکان، به قرار زیر می‌باشد.

$$\alpha_{avg} = 1.3345 \quad (25)$$

کنون که مکان مناسب محرک‌ها مشخص گردید، قاب در برابر شتاب نگاشت زمین لرزه‌های السنترو، کوبه، هچینوهه و نورتریج قرار می‌گیرد و با راه کار پیشنهادی، پاسخ‌های سازه کنترل خواهد شد. در جدول (۷)، پاسخ‌های سازه کنترل شده و کنترل نشده مقایسه می‌شوند.

جدول ۷: پاسخ‌های قاب سه طبقه با بهره جویی از ضریب شتاب میانگین در ساختار کنترل

زمین لرزه	طبقه	کنترل نشده		کنترل شده با شبکه‌ی عصبی		درصد کاهش پاسخ سازه	
		تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)
Northridge	1	0.04717	10.4707	0.004662	6.3369	90.11	39.47
	2	0.041047	19.5579	0.00326	5.7072	92.05	70.81
	3	0.031162	29.0367	0.005187	5.5355	83.35	80.93
	4	0.01772	35.8948	0.001658	3.6431	90.64	89.85
Kobe	1	0.04233	10.0052	0.003339	2.4939	92.11	75.07
	2	0.034825	18.3647	0.00413	2.6971	88.14	85.31
	3	0.025533	23.445	0.003609	3.142	85.86	86.59
	4	0.013843	25.6065	0.001799	2.4152	87.00	90.56
Elcentro	1	0.011348	4.0299	0.001378	3.1082	87.85	22.87
	2	0.009388	5.0329	0.00204	3.9896	78.27	20.72
	3	0.007348	6.3439	0.001651	3.1696	77.53	50.03
	4	0.004364	7.8749	0.00114	1.6722	73.87	78.76
Hachinohe	1	0.010214	2.4768	0.001051	0.6785	89.71	72.60
	2	0.009247	4.9215	0.001292	1.7849	86.02	63.73
	3	0.007126	7.0128	0.00116	0.9877	83.72	85.91
	4	0.004001	8.2383	0.0006	1.1412	85.00	86.14

مقدارهای جدول (۷)، کارکرد بسیار مناسب فن پیشنهادی را نشان می‌دهند. روش پیشنهادی، شتاب طبقه‌ی بام را برای زمین لرزه السنترو و نورتریج، به ترتیب، ۷۸،۷۶ و ۸۹،۸۵ درصد کاهش می‌دهد. باید آگاه بود، برای یافتن ضریب شتاب از این زمین لرزه‌ها بهره جویی نشده است. بنابراین، کاهش پاسخ‌های سازه‌ای که با فن پیشنهادی کنترل شود در هر زمین لرزه دیگری رخ می‌دهد.

۳-۶- ارزیابی روش در کنترل سازه‌ی پنج طبقه

در این بخش، از شیوه‌ی پیشنهادی برای کنترل قاب پنج طبقه بهره جویی می‌شود. سازه دارای دوره‌ی تناوب ۰/۳ ثانیه و نسبت میرایی ۲٪ در مد یکم است. جرم هر طبقه ۵،۸۹۸ کیلونیوتن مجذور ثانیه بر متر و سختی هر طبقه، به ترتیب، ۳۳۷۳۲، ۲۹۰۹۳، ۲۸۶۲۱، ۲۴۹۵۴ و ۱۹۰۵۹ کیلو نیوتن بر متر می‌باشد. میرایی طبقه‌ها ۶۷، ۵۸، ۵۷، ۵۰ و ۳۸ کیلو نیوتن ثانیه بر متر است [۲۴]. مانند نمونه‌های عددی پیشین، مکان بهینه‌ی محرک‌ها و ضریب شتاب در آن مکان، با هدف کمینه شدن شتاب طبقه‌ی بام تعیین می‌گردد. در این حالت، بهترین مکان قرار گیری محرک‌ها در طبقه‌های سوم و پنجم است. مقدار ضریب شتاب میانگین در زیر می‌آید.

$$\alpha_{avg} = 1.0495 \quad (26)$$

این ضریب برای محاسبه‌ی نیروی کنترلی به کار می‌رود. پاسخ‌های سازه‌ی کنترل شده با فن پیشنهادی، با سازه‌ی کنترل نشده در جدول (۸) مقایسه می‌شوند.

جدول ۸: پاسخ‌های قاب پنج طبقه با بهره جویی از ضریب شتاب میانگین با هدف کمینه شدن شتاب

زمین لرزه	طبقه	کنترل نشده		کنترل شده با شبکه‌ی عصبی		درصد کاهش پاسخ سازه	
		تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)
Northridge	1	0.0239	8.617	0.0028	5.6175	88.28	34.81
	2	0.0251	17.45	0.0024	3.5696	90.43	79.54
	3	0.0212	24.24	0.0028	4.273	86.79	82.37
	4	0.0176	30.808	0.0033	4.7239	81.25	84.67
	5	0.0122	35.568	0.0012	3.9926	90.16	88.77
Kobe	1	0.01835	5.8997	0.002	1.8792	89.10	68.15
	2	0.01904	12.221	0.0017	1.4858	91.07	87.84
	3	0.0159	17.782	0.0021	1.8697	86.79	89.49
	4	0.01309	22.497	0.0022	2.3295	83.19	89.65
	5	0.00905	25.729	0.0008	2.6502	91.16	89.7
Elcentro	1	0.00819	4.1015	0.001	3.1578	87.79	23.01
	2	0.0084	7.3952	0.0008	2.7378	90.47	62.98
	3	0.0068	9.4148	0.0012	4.3885	82.35	53.39
	4	0.0054	11.447	0.0011	3.3078	79.63	71.1
	5	0.0036	13.038	0.0006	2.2081	83.33	83.06
Hachinohe	1	0.0036	1.7069	0.0008	0.4471	77.77	73.81
	2	0.0037	2.218	0.0006	0.5952	83.78	73.17
	3	0.003	3.227	0.0006	0.7459	80	76.89
	4	0.002	4.093	0.0009	0.8834	55	78.42
	5	0.0017	4.7099	0.0003	1.0319	82.353	78.09

با توجه به کاهش چشمگیر تغییر مکان و شتاب در همه‌ی طبقه‌ها، می‌توان به کارکرد مناسب شیوه‌ی پیشنهادی در کنترل سازه پی برد. آن گونه که جدول (۸) نشان می‌دهد، شتاب و تغییر مکان‌های تمامی طبقه‌های سازه در این حالت کاهش زیادی دارند. در این جا نیز در زمین لرزه‌های السنترو و نورتریج جابه‌جایی‌های نسبی سازه در طبقه‌ی پنجم به ترتیب ۸۳ و ۹۰ درصد کاهش داشته‌اند. کاهش شتاب در این طبقه‌ها زیر اثر همین زمین لرزه‌ها به ترتیب ۸۸ و ۸۳ درصد می‌باشد.

۴-۶- ارزیابی روش در کنترل قاب شش طبقه

در نمونه‌ی عددی چهارم به بررسی پاسخ‌های سازه‌ای شش طبقه، که با کمک رابطه‌ی سازی پیشنهادی کنترل می‌گردد، پرداخته خواهد شد. جرم همه‌ی طبقه‌های این قاب برابر با ۲۲۷ کیلونیوتن مجذور ثانیه بر متر و سختی و میرایی هر طبقه، به ترتیب، ۲۹٫۷ کیلونیوتن بر متر و ۳۰٫۷۴۱۸۷ کیلونیوتن ثانیه بر متر است [۲۵]. بهترین مکان محرک‌ها و ضریب شتاب، برای کمینه کردن شتاب طبقه-ی ششم، در جدول (۹)، می‌آید.

جدول ۹: مناسب ترین ضریب شتاب در مکان های مختلف فرارگیری محرک ها

زمین لرزه	مکان محرک	ضریب شتاب	شتاب طبقه ی بام (متر بر مجذور ثانیه)
Kobe	1-6	2	4.8936
	2-6	1.801	3.5693
	3-6	1.628	1.5248
	4-6	0.72	2.6309
	5-6	0	6.1342
Hachinohe	1-6	2.663	1.6775
	2-6	2.255	1.2031
	3-6	1.671	0.4363
	4-6	0.632	1.1983
	5-6	0.002	3.2357

بنابراین، بهترین مکان فرارگیری محرک ها در طبقه ی سوم و ششم است. هنگامی که محرک در این طبقه ها قرار می گیرند، ضریب شتاب برای شتاب نگاشت زمین لرزه های کوبه و هچینوهه، به ترتیب، مقدارهای ۱,۶۲۸ و ۱,۶۷۱ را دارد. در آفرینش نیروی کنترلی از ضریب شتاب میانگین زیر بهره جویی می شود.

$$\alpha_{avg} = 1.6495 \quad (27)$$

پس از این که مکان مناسب محرک ها و ضریب شتاب متناظر به دست آمد، سازه زیر اثر شتاب نگاشت زمین لرزه های السنترو، نورتریج، هچینوهه و کوبه کنترل می شود. پاسخ های سازه، در حالت های کنترل شده و کنترل نشده، همانند جدول (۱۰) می باشد.

جدول ۱۰: پاسخ های قاب شش طبقه با بهره جویی از ضریب شتاب میانگین با هدف کمینه شدن شتاب

زمین لرزه	طبقه	کنترل نشده		کنترل شده با شبکه ی عصبی		درصد کاهش پاسخ سازه	
		تغییر مکان (نسبی) (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	تغییر مکان (نسبی) (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)
Northridge	1	0.04433	7.4982	0.004926	6.0821	88.88	18.88
	2	0.045806	11.4257	0.004147	4.2473	90.94	62.82
	3	0.043458	15.3172	0.009926	9.4316	77.15	38.42
	4	0.036938	18.4816	0.007652	4.7233	79.28	74.44
	5	0.02675	21.2611	0.002516	6.4288	90.59	69.76
	6	0.014008	22.7942	0.005387	4.0964	61.54	82.02
Kobe	1	0.067551	6.3338	0.007436	3.0864	88.99	51.27
	2	0.064462	11.8651	0.004015	1.6012	93.77	86.50
	3	0.057403	16.7296	0.007829	11.0759	86.36	33.79
	4	0.04666	21.2955	0.009895	2.1009	78.79	90.13
	5	0.032922	25.279	0.003213	2.977	90.24	88.22
	6	0.017023	27.398	0.003912	5.0509	77.01	81.56
Elcentro	1	0.024188	3.5506	0.003003	2.9613	87.58	16.59
	2	0.022388	5.5689	0.002164	2.4276	90.33	56.40
	3	0.019946	6.8801	0.00445	5.3642	77.68	22.03
	4	0.017271	8.0975	0.003997	2.439	76.85	69.88
	5	0.012752	9.3193	0.001356	3.0777	89.36	66.97
	6	0.006783	9.9039	0.002401	2.377	64.60	75.99

ادامه جدول ۱۰:

زمین لرزه	طبقه	کنترل نشده		کنترل شده با شبکه‌ی عصبی		درصد کاهش پاسخ سازه	
		تغییر مکان (نسبی) (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	تغییر مکان (نسبی) (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)
Hachinohe	1	0.016151	1.4307	0.00209	0.9212	87.05	35.61
	2	0.013987	2.7648	0.001111	0.5788	92.05	79.06
	3	0.011416	4.029	0.00227	1.0325	80.11	74.37
	4	0.00937	4.9338	0.002455	0.5083	73.79	89.69
	5	0.006653	5.4458	0.000727	0.7109	89.07	86.94
	6	0.003445	5.6474	0.001171	0.5657	66.00	89.98

جدول (۱۰) نشان می‌دهد که شتاب و تغییر مکان نسبی در تمامی طبقه‌ها، کاهش چشمگیری دارد. بنابراین، رابطه سازی پیشنهادی در کنترل این قاب شش طبقه هم کارکرد مناسبی دارد.

۵-۶- ارزیابی روش در کنترل سازه‌ی هفت طبقه

در این نمونه‌ی عددی به کنترل قاب هفت طبقه پرداخته می‌شود [۱۵]. سقف‌های این قاب سخت پنداشته شده است. بنابراین، هر طبقه یک درجه آزادی دارد و در مجموع سازه دارای هفت درجه آزادی است. جرم هر طبقه ۵,۹۲۰ کیلو نیوتن در مجذور ثانیه بر متر، سختی و میرایی طبقه‌ها، به ترتیب، ۲۲۷۰۵ کیلو نیوتن بر متر و ۶۶۷۴ کیلو نیوتن ثانیه بر متر می‌باشد. برای به فرمان آوردن رفتار قاب از دو محرک بهره جویی می‌گردد. رابطه‌ی میان نیروی کنترلی محرک‌ها از رابطه‌ی (۲۳)، به دست می‌آید. با قرارگیری یک محرک در طبقه-۱ بام، مکان محرک دیگر به گونه‌ای مشخص می‌شود که شتاب سازه در این طبقه کمینه گردد. با روشی که در نمونه‌های عددی پیشین شرح داده شد، بهترین مکان قرارگیری محرک‌ها و ضریب شتاب مناسب مشخص می‌شود.

جدول ۱۱: مناسب ترین ضریب شتاب در مکان‌های مختلف قرار گیری محرک‌ها

زمین لرزه	مکان محرک	ضریب شتاب	شتاب طبقه‌ی بام (متر بر مجذور ثانیه)
Kobe	1-7	3.0733	7.13
	2-7	2.9951	5.92
	3-7	2.3851	3.98
	4-7	1.2434	4.12
	5-7	0.1173	6.33
	6-7	0.02424	8.81
Hachinohe	1-7	3.4721	3.09
	2-7	3.1515	2.28
	3-7	2.6119	1.24
	4-7	1.5718	1.46
	5-7	0.00782	3.18
	6-7	0	6.26

با هدف کمینه شدن شتاب سازه در طبقه‌ی هفتم و بر پایه‌ی جدول (۱۱)، بهترین مکان قرارگیری محرک‌ها، طبقه‌ی هفتم و سوم است. با بررسی این جدول، می‌توان دریافت که ضریب‌های شتاب به شتاب نگاشت زمین لرزه بستگی دارد ولی در تمامی زمین لرزه

ها این ضریب ها در یک محدوده کوچکی است و اختلاف چندانی با هم ندارند. بنابراین، می توان از میانگین این ضریب ها برای آفرینش نیروی کنترلی بهره جویی کرد. ضریب شتاب میانگین این قاب به قرار زیر است.

$$\alpha_{avg} = 2.4985 \quad (28)$$

جدول (۱۲) پاسخ های سازه را زیر اثر زمین لرزه های هچینوهه، نورتریج، کوبه و السنترو با به کارگیری ضریب شتاب میانگین در ساختار کنترل نشان می دهد.

جدول ۱۲: پاسخ های قاب هفت طبقه با بهره جویی از ضریب شتاب میانگین در ساختار کنترل

زمین لرزه	طبقه	کنترل نشده		کنترل شده با شبکه ی عصبی		درصد کاهش پاسخ سازه	
		تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)
Northridge	1	0.035502	7.2957	0.004008	10.3989	88.71	-42.53
	2	0.036991	10.8604	0.004583	5.9874	87.61	44.86
	3	0.036177	14.2274	0.008368	13.9319	76.86	2.07
	4	0.032525	17.0328	0.007867	6.0129	75.81	64.69
	5	0.026267	19.9086	0.005503	11.555	79.04	41.95
	6	0.018298	22.0299	0.002778	5.5504	84.81	74.80
	7	0.009368	23.1374	0.0076	8.0488	18.87	65.21
Kobe	1	0.064526	7.2383	0.004074	5.0845	93.68	29.75
	2	0.062266	13.8383	0.002918	2.4403	95.31	82.36
	3	0.056618	19.3243	0.005676	11.1563	89.97	42.26
	4	0.048125	23.3671	0.008248	3.0471	82.86	86.95
	5	0.037574	25.9175	0.004274	4.9495	88.62	80.90
	6	0.025663	27.219	0.002089	3.4906	91.85	87.17
	7	0.012986	27.682	0.006289	6.4656	51.57	76.64
Elcentro	1	0.018556	3.4641	0.003009	5.1102	83.78	-47.51
	2	0.018122	5.4042	0.001921	4.7502	89.39	12.10
	3	0.018075	6.7978	0.004123	8.0415	77.18	-18.29
	4	0.016665	7.8318	0.003621	3.1271	78.27	60.07
	5	0.013822	9.5835	0.002338	5.1284	83.08	46.48
	6	0.009806	10.6267	0.001487	3.0754	84.83	71.05
	7	0.005383	11.1392	0.003503	4.6158	34.92	58.56
Hachinohe	1	0.012898	1.733	0.001188	1.2845	90.78	25.87
	2	0.011141	3.281	0.000758	0.7259	93.19	77.87
	3	0.0091	4.604	0.001663	4.7859	81.72	-3.95
	4	0.007524	5.274	0.002033	0.9201	72.97	82.55
	5	0.006384	5.255	0.001187	1.2651	81.40	75.92
	6	0.004799	4.88	0.000852	0.7946	82.24	83.71
	7	0.002585	4.987	0.001981	2.5926	23.36	48.01

برای بررسی توانایی این روش در مقایسه با دیگر روش ها، پاسخ های بام این سازه هنگامی که روش پیشنهادی، روش LQR و راه کار پیشنهادی در مرجع ۱۳، برای کنترل سازه زیر اثر زمین لرزه ی کوبه به کار رفته اند در زیر می آید.

جدول ۱۳: پاسخ‌های بام قاب هفت طبقه زیر اثر زمین لرزه‌ی کوبه با روش‌های کنترلی مختلف

	LQR	روش پیشنهادی مرجع ۱۳	روش پیشنهادی این مقاله
بیشترین جابجایی	0.2024	0.0486	۰,۰۳۳۵۶
بیشترین شتاب	13.71	20.5	6.4656

۶-۶- ارزیابی روش در کنترل قاب هشت طبقه

در این نمونه‌ی عددی، کارکرد رابطه سازی پیشنهادی در کنترل سازه‌ی هشت طبقه بررسی می‌گردد [۲۶]. سقف‌های سازه سخت پنداشته می‌شود. بنابراین، سازه در هر طبقه یک درجه آزادی و در مجموع هشت درجه آزادی دارد. جرم هر طبقه ۳۴۵,۶ کیلونیوتن مجذور ثانیه بر متر و به صورت انباشته در تراز طبقه است. سختی و میرایی هر طبقه، به ترتیب، 340.4 کیلونیوتن بر متر و 2937 کیلونیوتن ثانیه بر متر می‌باشد. مکان و ضریب شتاب مناسب با هدف کمینه کردن شتاب طبقه‌ی بام مشخص می‌شود.

جدول ۱۴: مناسب ترین ضریب شتاب در مکان‌های مختلف قرار گیری محرک‌ها

زمین لرزه	مکان محرک	ضریب شتاب	شتاب طبقه‌ی بام (متر بر مجذور ثانیه)
Kobe	1-8	3.712	11.0524
	2-8	3.415	8.8285
	3-8	3.059	6.8374
	4-8	2.378	4.6263
	5-8	0.827	6.7051
	6-8	0	15.99
	7-8	0	24.2439
Hachinohe	1-8	3.477	7.0098
	2-8	3.221	5.4211
	3-8	2.789	3.111
	4-8	2.119	1.7731
	5-8	1.8	3.8504
	6-8	0.836	5.8907
	7-8	0	7.7179

هنگامی که محرک‌ها در طبقه‌های چهارم و هشتم قرار دارند، شتاب طبقه‌ی بام کمترین مقدار را داراست. ضریب شتاب‌ها در این حالت، برای زمین لرزه‌های کوبه و هچینوهه به ترتیب، ۲,۳۷۸ و ۲,۱۱۹ می‌باشد. همانند نمونه‌های عددی پیشین، از ضریب شتاب میانگین زیر برای کنترل سازه بهره جویی می‌شود.

$$\alpha_{avg} = 2.2485 \quad (29)$$

این قاب تحت تاثیر زمین لرزه‌های السنتره، هچینوهه، کوبه و نورتریج قرار می‌گیرد. با به کارگیری این ضریب در تولید نیروی کنترلی، رفتار سازه بررسی می‌شود. در جدول (۱۵)، مقایسه‌ی پاسخ‌های سازه کنترل شده با رابطه سازی پیشنهادی و سازه‌ی کنترل نشده، انجام می‌شود.

جدول ۱۵: پاسخ‌های قاب هشت طبقه با بهره جویی از ضریب شتاب میانگین در ساختار کنترل

زمین لرزه	طبقه	کنترل نشده		کنترل شده با شبکه‌ی عصبی		درصد کاهش پاسخ سازه	
		تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)
Northridge	1	0.081947	6.4131	0.015241	7.8758	81.40	-22.80
	2	0.073363	8.9208	0.006219	8.7021	91.52	2.45
	3	0.061832	11.4354	0.011084	7.2058	82.07	36.98
	4	0.05369	12.3653	0.016699	14.6047	68.89	-18.11
	5	0.05015	13.6496	0.014364	5.7384	71.35	57.95
	6	0.043855	14.556	0.010764	9.9081	75.45	31.93
	7	0.032918	16.5648	0.010534	5.2221	67.99	68.47
	8	0.017721	18.5028	0.014892	9.5271	15.96	48.50
Kobe	1	0.091002	4.5959	0.013371	5.1338	85.30	-11.70
	2	0.090252	8.6233	0.005883	6.3477	93.48	26.38
	3	0.085946	11.4743	0.008093	5.1818	90.58	54.83
	4	0.078067	13.7016	0.014616	9.6601	81.27	29.49
	5	0.067043	16.1216	0.016119	2.5785	75.95	84.00
	6	0.053436	18.5279	0.010122	6.4909	81.05	64.96
	7	0.037526	20.7727	0.008902	4.1023	76.27	80.25
	8	0.019465	22.1962	0.014309	6.6996	26.48	69.81
Elcentro	1	0.032511	4.0822	0.004943	5.0506	84.79	-23.72
	2	0.032359	5.2333	0.001521	4.8619	95.29	7.09
	3	0.03125	5.566	0.006501	3.7431	79.19	32.75
	4	0.029244	6.0588	0.007741	10.3353	73.52	-70.58
	5	0.026065	7.52	0.006766	2.928	74.04	61.06
	6	0.021435	8.6054	0.004534	5.5586	78.84	35.40
	7	0.015322	9.2574	0.002436	3.8637	84.10	58.26
	8	0.007999	9.6927	0.006005	4.2583	24.92	56.06
Hachinohe	1	0.025347	1.9418	0.004049	1.9538	84.02	-0.61
	2	0.024165	3.3108	0.001902	2.1464	92.12	35.16
	3	0.022193	4.0257	0.003207	1.8796	85.54	53.30
	4	0.019542	4.2206	0.004079	3.1577	79.12	25.18
	5	0.017281	4.1271	0.006204	1.0078	64.09	75.58
	6	0.014837	4.4011	0.004308	2.2449	70.96	48.99
	7	0.010926	5.6352	0.002316	1.6709	78.80	70.34
	8	0.005864	6.4309	0.004242	1.7793	27.66	72.33

دقت در داده‌های جدول (۱۵) کارکرد مناسب ساختار کنترلی به کار رفته را تایید می نماید. در این نمونه‌ی عددی، تغییر مکان نسبی بیشینه‌ی طبقه ی بام ۲۷٫۶۶ درصد کاهش یافت. مقدار این کاهش نسبت به سازه‌هایی که تا کنون بررسی شده‌اند چندان زیاد نیست. از این رو، تغییر مکان طبقه‌ی بام که برابر با مجموع تغییر مکان‌های نسبی طبقه‌ها است، آورده بررسی می‌شوند. مقایسه‌ی تغییر مکان طبقه‌ی بام و مجموع شتاب‌های طبقه‌ها در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده در جدول (۱۶) انجام می‌پذیرد.

جدول ۱۶: پاسخ‌های قاب هشت طبقه با بهره جویی از ضریب شتاب میانگین در ساختار کنترل

زمین لرزه	طبقه	کنترل نشده			کنترل شده با شبکه‌ی عصبی			درصد کاهش پاسخ سازه		
		تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	شتاب تجمعی (متر بر مجذور ثانیه)	تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	شتاب تجمعی (متر بر مجذور ثانیه)	تغییر مکان نسبی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	شتاب تجمعی (متر بر مجذور ثانیه)
Northridge	1	0.081947	6.4131	6.4131	0.015241	7.8758	7.8758	81.40	-22.80	-22.80
	2	0.15531	8.9208	15.3339	0.02146	8.7021	16.5779	86.18	2.45	-8.11
	3	0.217142	11.4354	26.7693	0.032544	7.2058	23.7837	85.01	36.98	11.15

ادامه جدول ۱۶:

Northridge	4	0.270832	12.3653	39.1346	0.049243	14.6047	38.3884	81.81	-18.11	1.90
	5	0.320982	13.6496	52.7842	0.063607	5.7384	44.1268	80.18	57.95	16.40
	6	0.364837	14.556	67.3402	0.074371	9.9081	54.0349	79.61	31.93	19.75
	7	0.397755	16.5648	83.905	0.084905	5.2221	59.257	78.65	68.47	29.37
	8	0.415476	18.5028	102.4078	0.099797	9.5271	68.7841	75.98	48.50	32.83
Kobe	1	0.091002	4.5959	4.5959	0.00013371	5.1338	5.1338	99.85	-11.70	-11.70
	2	0.181254	8.6233	13.2192	0.019254	6.3477	11.4815	89.37	26.38	13.14
	3	0.2672	11.4743	24.6935	0.027347	5.1818	16.6633	89.76	54.83	32.51
	4	0.345267	13.7016	38.3951	0.041963	9.6601	26.3234	87.84	29.49	31.44
	5	0.41231	16.1216	54.5167	0.058082	2.5785	28.9019	85.91	84.00	46.98
	6	0.465746	18.5279	73.0446	0.068204	6.4909	35.3928	85.35	64.96	51.54
	7	0.503272	20.7727	93.8173	0.077106	4.1023	39.4951	84.67	80.25	57.90
	8	0.522737	22.1962	116.0135	0.091415	6.6996	46.1947	82.51	69.81	60.18
Elcentro	1	0.032511	4.0822	4.0822	0.00004943	5.0506	5.0506	99.84	-23.72	-23.72
	2	0.06487	5.2333	9.3155	0.006464	4.8619	9.9125	90.03	7.09	-6.40
	3	0.09612	5.566	14.8815	0.012965	3.7431	13.6556	86.51	32.75	8.23
	4	0.125364	6.0588	20.9403	0.020706	10.3353	23.9909	83.48	-70.58	-14.56
	5	0.151429	7.52	28.4603	0.027472	2.928	26.9189	81.85	61.06	5.415
	6	0.172864	8.6054	37.0657	0.032006	5.5586	32.4775	81.48	35.40	12.37
	7	0.188186	9.2574	46.3231	0.034442	3.8637	36.3412	81.69	58.26	21.54
	8	0.196185	9.6927	56.0158	0.040447	4.2583	40.5995	79.38	56.06	27.52
Hachinohe	1	0.025347	1.9418	1.9418	0.004049	1.9538	1.9538	84.02	-0.61	-0.61
	2	0.049512	3.3108	5.2526	0.005951	2.1464	4.1002	87.98	35.16	21.93
	3	0.071705	4.0257	9.2783	0.009158	1.8796	5.9798	87.22	53.30	35.55
	4	0.091247	4.2206	13.4989	0.013237	3.1577	9.1375	85.49	25.18	32.30
	5	0.108528	4.1271	17.626	0.019441	1.0078	10.1453	82.08	75.58	42.44
	6	0.123365	4.4011	22.0271	0.023749	2.2449	12.3902	80.74	48.99	43.75
	7	0.134291	5.6352	27.6623	0.026065	1.6709	14.0611	80.59	70.34	49.16
	8	0.140155	6.4309	34.0932	0.030307	1.7793	15.8404	78.37	72.33	53.53

نتیجه‌های آمده در جدول (۱۶) کارایی مناسب فرآیند پیشنهادی برای کنترل این سازه را نشان می‌دهد. همان گونه که مشخص است، تغییر مکان بام این قاب هم به طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند.

۷- نتیجه گیری

ساختار کنترلی پیشنهادی به صورت حلقه‌ی بسته است و می‌تواند، با تغییر در ویژگی‌های سامانه، سازگار شود. این توانایی سبب شد که پاسخ‌های سازه کاهش قابل توجهی داشته باشند تا آن جا که تغییر مکان‌های نسبی سازه در سازه‌ی سه طبقه زیر اثر لرزه‌های متفاوت تا نود درصد کاهش داشت. با افزایش ارتفاع سازه، در برخی از طبقه‌ها شتاب افزایش می‌یابد. درباره‌ی سازه‌های هفت و هشت طبقه این افزایش شتاب دیده می‌شود، ولی هم چنان تغییر مکان‌های سازه و شتاب طبقه‌ی بام کاهش چشمگیری دارند. با افزایش شمار طبقه‌ها، توانایی این روش کاهش پیدا می‌کند. خاطر نشان می‌سازد، کارهای عددی فراوانی برای ارزیابی رابطه‌ی پیشنهادی انجام پذیرفت که به سبب حجم محدود مقاله نمی‌توان همه‌ی آن‌ها را آورد. با انجام این آزمون‌ها، کاستی‌های روش خود را نشان دادند و تغییرهای مورد نیاز وارد تحلیل گردیدند. با این همه آشکار شد، هنگامی که بر طبقه‌های قاب افزوده می‌شود، به تدریج توانایی این روش کاهش می‌یابد و باید برای سازه‌های بلند، فرآیند را تغییر اساسی داد.

۸- واژه نامه

به فرمان آوری فعال (Active control)، محرک (Actuator)، شبکه‌ی عصبی ساختگی (Artificial Neural Network)، روش بهینه سازی ارثی (Genetic algorithm optimization)، لایه پنهان (Hidden layer)، لایه درون داد (Input layer)، شبکه‌ی عصبی

احتمالی شبکه بندی شده (LPNN (Lattice probabilistic neural network))، سامان دهنده‌ی درجه‌ی دوم خطی (LQR)، لایه برون داد (Output layer).

مراجع

- [1]. Haung W., Gould P.L., Martinez R, and Johnson GS. (2004). Non-linear Analysis of a Collapse Reinforced Concrete Chimney. *Earthquake Engng Struct.*, Dyn, 33, 485-498.
- [2]. Hurlebaus S, and Gaul L. (2006). Smart Structure Dynamics. *Mech. Syst. Signal Process.*, 20, 255_281.
- [3]. Connor J. (2000). Introduction to Motion on Control. Massachusetts Institute of Technology.
- [4]. Gaul L, Hurlebaus S, Wirtitzer J, and Albrechet H. (2008). Enhanced Damping of Lightweight Structures by Semi-active Joints. *Acta Mech.*, 195,249-261.
- [5]. Kerber F., Hurlebaus S., Beadle B. M., and Stobener U. (2007). Control Concepts for an Active Vibration Isolation System. *Mech. Syst. Signal Process.*, 21, 3042-59.
- [6] Menhaj, Mohammad bagher. (2009). *Computational intelligence*. Tehran. Prof Hesabi.
- [7]. Yasser Bigdeli, dookie kim and seongkyu chang. (2014). Vibration control of irregular buildings by using developed neuro-controller strategy. *Structure engineering and Mechanics*, Vol.49, No. 6, 687-703
- [8]. A. Karamodin, and H. H-Kazemi. (2010). Semi-active Control of Structures Using Neuro-predictive Algorithm for MR Dampers. *Struct. Control Health Monit*, 17, 237-253.
- [9]. Heon-jae Lee, Guangqiang yang, Hyung-Jo Jung, Billie F. Spencer, Jr. and In-Won Lee. (2006). Semi-active NeuroControl of a Base-Isolated Benchmark Structure. *Struct. Control Health Monit*, 13, 682-692.
- [10]. Irfan H. Vadtala, Devesh P. Soni, Dolarray. G. Panchal. (2.13). Semi-Active Control of a Benchmark Building using Neuro-Inverse Dynamics of MR Damper. *Procedia Engineering*, 51, 45 – 54.
- [11]. Osman E. Ozbulut *, Maryam Bitaraf, Stefan Hurlebaus. (2011). Adaptive control of base-isolated structures against near-field earthquakes using variable friction dampers. *Engineering Structures*, 33, 3143–3154.
- [12]. J. Ghaboussi, and A. Joghataei. (1995). Active Control of Structures Using Neural Networks. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE 121 (4), 555-567.
- [13]. H. M. Chen, K. H. Tsai, G. Z. Qi, J. C. S. Yang, and F. Amini. (1995). Neural Network for Structure Control. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE 9 (2), 168-176,
- [14]. K. Bani-Hani, and J. GHaboussi. (1998). Nonlinear Structure Control Using Neural Networks. *Jurnal of Engineering Mechanics*, ASCE 124 (2), 319-327
- [15]. M. Rezaiee-Pajand, M-R Akbarzadeh-T, and A. Nikdel. (2009). Direct Adaptive Neurocontrol of Structures under Earth Vibration. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE 0887-3801, 23(5), 299-307.
- [16]. M. Rezaiee-Pajand, and M. Payandeh Sani. (2015). Three Schemes for Active Control of the Planer Frame. *Int. J. Optim. Civil Eng.*, 5(1):117-135.
- [17]. Hong-Nan Li, and Hao Yang, “System Identification of Dynamic Structure by the Multi-branch BPNN”, *Neurocomputing* 70, 835-841, (2007).
- [18]. Kim D. K., Lee JJ, and Chang S. K. (2007). Active Vibration Control of a Structure Using Probabilistic Neural Network. In: *86th Annual Meeting, Compendium of papers*, City: Washington, D.C.
- [19]. Dong yawn Kim, Dookie Kim, Seongkyu Chang, and Hie-Young Jung. (2008). Active Control Strategy of Structures Based on Lattice Type Probabilistic Neural Network. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 23, 45-50.
- [20]. Ryan Mitchell, Young-Jin Cha, Yeeseok Kim and Aniket Anil Mahajan. (2015). Active control of highway bridges subject to a variety of earthquake loads. *Earthq Eng & Eng Vib.* 14: 253-263
- [21]. Anil K. Chopra. (2007). *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Third edition. Pearson Prentice Hall
- [22]. Aaron S. Brown, and Henry T. Y. Yang. (2001). Neural Networks for Multiobjective Adaptive Structural Control. *Journal of Structure Engineering*, vol. 127, 0203-0210.
- [23]. Dorey, A. P., and Moore, J. H. (1995). *Advances in Actuators*. Institute of Physics Publishing, Philadelphia, U.S.A.
- [24]. Khaldoon A. Bani-Hani, and Mashal A. Sheban. (2006). Semi-active Neuro-control for Base-isolation System Using Magnetorheological (MR) Dampers. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 35, 1119-1144.
- [25]. Bitaraf Maryam, Osman E. Ozbulut, Stefan Hurlebaus, and Luciana Barroso. (2010). Application of Semi-active Control Strategies for Seismic Protection of Buildings with MR Dampers. *Engineering Structures*, 32, 3040-3047.
- [26]. Madan, A. (2005). Vibration Control of Building Structures Using Self-Organizing and Self-learning Neural Networks. *Jornal of Sound and Vibration*. 287, 759-784.