

## کاهش خیز جانبی قاب با کنترل فعال \*

محمد رضایی پزند<sup>(۱)</sup> محمد رضا اکبرزاده توتونچی<sup>(۲)</sup> علی نیکدل<sup>(۳)</sup>

**چکیده** کمینه کردن پاسخ سازه در برابر نوسان زمین با بهره‌گرفتن از ساختار کنترل حلقه باز هدف این مقاله می‌باشد. در این گونه کنترل فقط یک شبکه‌ی عصبی پیش‌بین وجود دارد و تنها نوسان زمین را انگاره می‌زند. شبکه‌ی عصبی براساس چند شتاب نگاشت ثبت شده آموزش می‌بیند و می‌تواند تغییرهای شتاب را در یک گام جلوتر پیش‌بینی کند. نیروی کنترل از حاصل ضرب جرم هر طبقه در شتاب گام جلوتر به دست می‌آید. این ساختار تا حدودی پاسخ سازه را کمینه می‌سازد. برای تضمین پایداری، یک کنترل‌کننده خطی به ساختار کنترل افزوده می‌شود و یک سامانه کنترل ترکیبی پدید می‌آید. این سامانه، افزون بر تضمین پایداری ساختار کنترل، کارکرد کنترل سازه را بهبود می‌بخشد. سرانجام، اثر تغییر جرم سازه بر روی ساختار کنترل بررسی می‌شود. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند، اثر تغییر جرم سازه بر روی سامانه‌ی کنترل ترکیبی، نسبت به سامانه کنترل با شبکه‌ی عصبی پیش‌بین، کمتر می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی** کنترل سازه، شتاب زمین، شبکه عصبی، کنترل‌کننده، پایداری، زمین لرزه، کنترل حلقه باز

## Reducing Frame Lateral Deflection by Active Control

M. Rezaieepajand

M.R. Akbarzadeh

A. Nikdel

**Abstract** It is aimed to minimize the structure response against the earth vibration by the use of the open loop control system. In such a control, only one predicting neural network is utilized, which estimates only the earth vibration. The neural network is instructed by some recorded acceleration data, and it is able to predict the acceleration variation for the subsequent step. The control force is equal to the product of the mass of each story to its next step acceleration. This control system leads to the approximate minimum response. Moreover, to guarantee the system stability, a linear controller is added to the system. The resulted mixed control system can assure the system stability and also has better performance. Finally, the effect of the structural mass variation on the control system is investigated. The findings show that the effect of the structural mass variation on the mixed control system is smaller than the one by the predicting neural network.

**Key Words** Structural Control, Earth Acceleration, Neural Networks, Controller, Stability, Earthquake, Open-loop Control.

\* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۷/۶/۲۷ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۹۰/۳/۱۹ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسؤل، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) دانشکده مهندسی، گروه برق، دانشگاه فردوسی مشهد

(۳) دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

### مقدمه

در سال‌های اخیر، پژوهش درباره کنترل فعال سازه، افزایش چشمگیری یافته است. همچنین، تحلیلگران روش‌های بسیاری برای کنترل فعال سازه پیشنهاد کرده‌اند. از میان آن‌ها، می‌توان شیوه‌های وابسته به الگوی سازه مانند: کنترل بهینه و کنترل تصادفی را نام برد. هر کدام از این فن‌ها، دارای زیر شاخه‌های زیادی می‌باشند. این فرایندها نیاز به تحلیل و یا تشخیص دستگاه دارند، که با انجام این کار و با کمک یک کنترل‌کننده، نوسان‌های سازه به فرمان در می‌آیند. در برابر این، کنترل هوشمند کوشش در شناسایی دستگاه با وجود عدم قطعیت‌های موجود در آن را دارد. باید افزود، شبکه‌های عصبی ابزار توانمندی برای شناسایی رفتار دستگاه و کنترل آن هستند. توانایی شبکه‌ی عصبی در شبیه‌سازی به اندازه‌ای است که می‌تواند رفتار غیرخطی سازه‌هایی با چندین درجه آزادی را در برابر نوسان زمین، شبیه‌سازی و یا حتی پیش‌بینی کند [1-3].

راهکارهای زیادی برای کنترل سازه به صورت حلقه بسته، با بهره گرفتن از شبکه‌های عصبی در دست است. ساده‌ترین روش استفاده از شبکه‌ی عصبی در کنترل سازه، پویا کردن مولفه‌های شیوه‌ی کنترل بهینه با شبکه‌ی عصبی می‌باشد [4]. در این روش، دو ماتریس  $Q$  و  $R$ ، که در مدت کنترل سازه آن‌ها را ثابت می‌پندارند، در هر لحظه به کمک شبکه‌ی عصبی مشخص می‌شوند. در روش دوم، ساختار کنترل، شامل یک شبکه‌ی عصبی و الگوی مرجع می‌باشد. در این شیوه، کوشش می‌شود که با استفاده از یک شبکه‌ی عصبی، رفتار سازه به رفتار الگوی مرجع نزدیک شود [5]. روش سوم، که معمول‌ترین راهکار برای به کار بردن شبکه‌های عصبی در کنترل سازه می‌باشد، از دو شبکه‌ی عصبی بهره می‌جوید. شبکه‌ی عصبی نخست، که شبیه‌ساز نام دارد، رفتار سازه را پیش‌بینی می‌کند. شبکه‌ی عصبی دوم را که کنترل‌کننده می‌نامند، وظیفه ایجاد نیروی کنترل را با توجه به پیش‌بینی رفتار سازه بر عهده دارد [6, 3, 7-9, 10]. روش

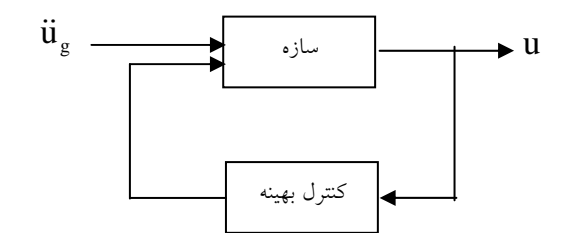
چهارم، که حالت تکمیل یافته فن سوم است، تنها از یک شبکه‌ی عصبی کنترل‌کننده استفاده می‌کند و به جای پیش‌بینی رفتار سازه، داده‌های الگوی سازه را به کار می‌برد [11]. روش پنجم، استفاده از یک شبکه‌ی عصبی شبیه‌ساز و یک قانون کنترل (راهکار نیوتن-رافسون) می‌باشد. وظیفه شبکه‌ی عصبی پیش‌بینی شتاب سازه است و قانون کنترل با توجه به پاسخ شبکه‌ی عصبی نسبت تغییر نیروی کنترل، برای گام جلوتر نیروی کنترل مناسب ایجاد می‌کند [12]. روش ششم از دو شبکه‌ی عصبی بهره می‌جوید. نخستین شبکه‌ی عصبی، شتاب سازه را در یک گام جلوتر پیش‌بینی می‌کند و شبکه‌ی عصبی دوم با توجه به پاسخ شبکه‌ی عصبی و شتاب زمین، نیروی کنترل را به دست می‌آورد [13]. در روش هفتم از یک شبکه‌ی عصبی کنترل‌کننده و تحلیل مودال استفاده می‌شود. شبکه‌ی عصبی با صفر کردن نیروی وارد بر مود نخست سازه، نیروی کنترل گام جلوتر را پدید می‌آورد [14].

در این مقاله، از روشی متفاوت و بسیار ساده‌تر از شیوه‌های به کار رفته برای کنترل سازه استفاده می‌شود. در واقع، به جای بهره گرفتن از پیش‌بینی رفتار سازه، برای کنترل از پیش‌بینی شتاب زمین استفاده خواهد شد. همچنین، در راهکار جدید، برای یافتن نیروی کنترل‌کننده، به پاسخ سازه نیاز نیست. بنابراین، روش پیشنهادی ساختار کنترل برگشتی یا بازخورد را لازم ندارد. از این رو، برای ساختار کنترل، تنها از یک ساختار رفت استفاده می‌شود. در شیوه‌ی پیشنهادی، هدف پیش‌بینی شتاب زمین در هر لحظه می‌باشد. همچنین، نیروی کنترل‌کننده را می‌توان از ضرب جرم هر طبقه در شتاب پیش‌بینی شده به دست آورد و با وارد کردن این نیرو، تغییر مکان سازه را به صفر نزدیک کرد. خاطر نشان می‌کند، اگر برای یافتن نیروی کنترل‌کننده از شتاب یک گام پیشتر استفاده شود، باز هم پاسخ‌های مناسبی به دست خواهد آمد.

### پیش‌بینی شتاب زمین

رفتار زمین در هنگام زمین لرزه، به طور کامل غیر خطی

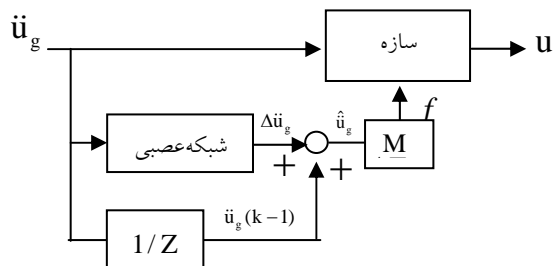
جدید بهتر ارزیابی می شود. یادآور می شود که روش های گوناگونی برای کنترل بهینه سازه وجود دارد. در نمونه عددی روش تنظیم کننده درجه دو خطی (LQR) به کار خواهد رفت. ساختار کنترل بهینه را می توان در شکل (۲) مشاهده کرد.



شکل ۲ الگوریتم کنترل بهینه

حالت سوم: این ساختار کنترلی، همانند شکل (۳)، شامل شبکه عصبی پیش بین و سازه می باشد. شبکه عصبی پیش بین با توجه به شتاب نگاشت های ثبت شده آموزش داده می شود و سپس در داخل الگوریتم کنترلی قرار می گیرد. در هنگام زلزله، با پیش بینی شتاب زمین در یک گام جلوتر، نیروی کنترلی به دست می آید. از این رو، نیروهایی که به سازه وارد می شوند، به قرار زیر می باشند:

۱. نیرویی که شتاب زمین به سازه وارد می کند.
۲. نیرویی کنترلی که از مجموع شتاب پیشین و تغییر شتاب پیش بینی شده با شبکه عصبی پیش بین، حاصل می شود. در این ساختار کنترل، کاهش تغییر مکان سازه بستگی به میزان آموزش شبکه عصبی دارد. هر مقدار که شبکه عصبی پیش بین بیشتر آموزش دیده باشد، پاسخ بهتری از سازه به دست خواهد آمد.



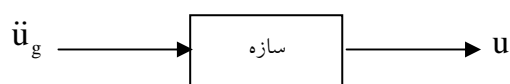
شکل ۳ الگوریتم کنترل با استفاده از شبکه عصبی

و نامشخص می باشد و نمی توان آن را با رابطه ساده ای مشخص کرد. از این رو، باید با کمک توانایی شبکه های عصبی به تشخیص و پیش بینی رفتار زمین پرداخت. برای انجام این کار، شبکه عصبی به گونه ای آموزش داده می شود که بتواند مقدار تغییرهای شتاب در گام بعدی (که می توان هر گام را برابر تاخیر زمانی در نظر گرفت) را پیش بینی کند. از جمع مقدار تغییرهای شتاب پیش بینی شده برای گام بعدی و مقدار شتاب در گام پیشین، مقدار شتاب در گام بعدی به دست می آید. شبکه عصبی که برای این کار استفاده می شود، شبکه عصبی پرسپترون چند لایه است. ورودی شبکه عصبی پرسپترون شتاب چند گام پیشین زمین و برون داد آن تغییر شتاب زمین برای گام بعدی می باشد. می توان برای آموزش آن از شیوه های مختلف آموزش شبکه های عصبی بهره جست.

### ساختارهای کنترل

برای ارزیابی شیوه پیشنهادی کنترل فعال سازه، بهتر است این راهکار با یک روش کنترل غیر هوشمند مقایسه شود. بنابراین، در ادامه کار، یک نمونه عددی برای مقایسه شیوه پیشنهادی، با یک روش کنترل غیر هوشمند ارائه می شود. ساختارهای کنترل که برای نمونه عددی به کار می رود، به قرار زیر هستند:

حالت یکم: نخستین حالت به سازه کنترل نشده اختصاص داده خواهد شد. در این حالت، فقط شتاب زمین به سازه وارد می شود و هیچ نیروی کنترل کننده ای برای کنترل سازه وجود ندارد. در بیشتر مقاله های پیشین، تنها این حالت برای ارزیابی استفاده شده است. شکل (۱) این حالت را نشان می دهد.



شکل ۱ الگوریتم سازه کنترل نشده

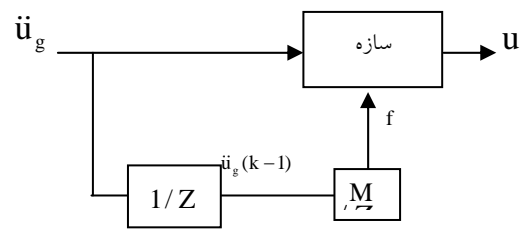
حالت دوم: از شیوه کنترل بهینه برای ایجاد نیروی کنترل استفاده خواهد شد. با این راهکار کنترل سازه، روش

جدول ۱ پاسخ‌های نمونه‌ی عددی یکم

e	شمار نرون‌های لایه سوم	شمار نرون‌های لایه دوم
۲۵۳/۵	۱۰	۱۵
۲۵۴/۳	۸	۱۰
۲۵۵	۶	۱۲
۲۵۸/۴	۸	۱۵
۲۶۰/۷	۱۲	۱۲
۲۸۳/۹	۱۴	۱۵
۲۸۹/۹	۱۱	۱۳
۲۹۵/۲	۱۱	۱۱
۳۰۴/۶	۱۳	۱۵
۳۳۲/۷	۱۳	۱۳

تابع‌های لایه‌های مخفی، سیگموئید و تابع لایه برونداد، خطی است. این شبکه عصبی، با دو شتاب نگاشت السترو و حجینو، که ۱۹۰۰۰ داده دارد، آموزش می‌بیند. برای آموزش شبکه عصبی از روش آموزش مارکوارت-لونبرگ، که همگرایی زیادی دارد، استفاده می‌شود. شکل (۵)، شبکه عصبی مورد نظر را نشان می‌دهد. مقدار دیرکرد زمانی ۰/۰۰۵ ثانیه است. پس از کامل شدن آموزش، نخست شبکه عصبی آموزش دیده برای پیش‌بینی دو شتاب‌نگاشت السترو و حجینو، که مجموعه داده‌های آموزش را تشکیل می‌دهند، به کار می‌رود. این کار، میزان توانایی شبکه عصبی را در پیش‌بینی داده‌های آموزش نشان می‌دهد. شکل‌های (۶) و (۷)، پیش‌بینی یک گام جلوتر را برای شتاب‌نگاشت‌های السترو و حجینو نشان می‌دهد. سپس، از شبکه عصبی آموزش دیده برای پیش‌بینی دو شتاب‌نگاشت نورتریج و کوبه که داده‌های آزمون هستند، بهره گرفته می‌شود. این کار، میزان توانایی شبکه عصبی را در پیش‌بینی شتاب‌نگاشت‌های جدید مشخص می‌کند. در شکل‌های (۸) و (۹)، پیش‌بینی یک گام جلوتر برای شتاب‌نگاشت‌های نورتریج و کوبه نشان داده شده است. جدول (۲)، میزان انحراف از معیار و درصد خطای مقدارهای پیش‌بینی شده نسبت به مقدارهای واقعی شتاب زمین را برای شتاب‌نگاشت‌های السترو، حجینو، نورتریج و کوبه نشان می‌دهد.

حالت چهارم: در این فرآیند، به جای پیش‌بینی شتاب برای گام بعدی، از شتاب در گام پیشین استفاده می‌شود. شکل (۴)، راهکار مزبور را نشان می‌دهد. در این شیوه اگر هر مقدار دیرکرد زمانی کمتر باشد، پاسخ سازه بهتر خواهد بود. در شکل‌های کنونی،  $1/Z$  دیرکرد زمان می‌باشد. این ساختارهای کنترلی در برنامه MATLAB شبیه‌سازی شده و بر روی یک سازه اجرا می‌شود [15,5].



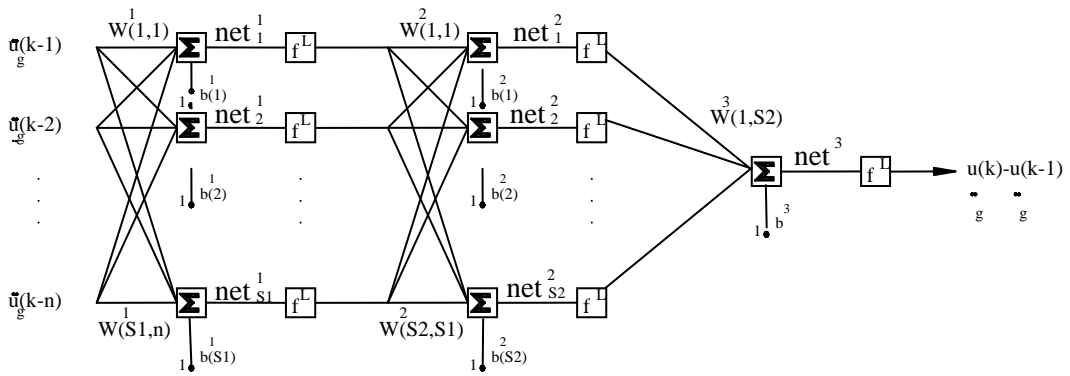
شکل ۴ الگوریتم کنترل با استفاده از گام پیشین شتاب زمین

### نمونه عددی یکم

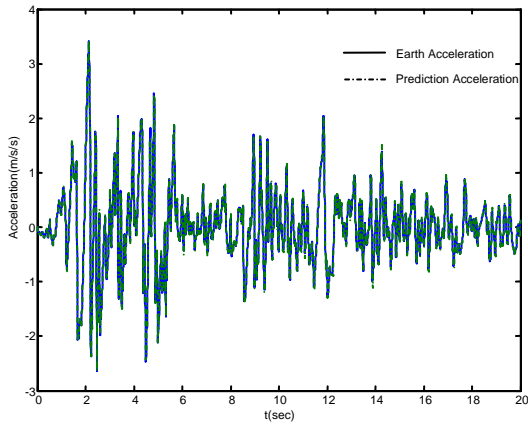
نخستین نمونه عددی، به آموزش شبکه‌ی عصبی می‌پردازد، که توانایی پیش‌بینی مقدار تغییر شتاب زمین در گام بعدی را دارد. برای انجام این کار، از یک شبکه عصبی پرسپترون چهار لایه استفاده می‌شود. لایه‌ی ورودی، دارای ۱۰ نرون است. ورودی شبکه عصبی، مقدارهای شتاب زمین در ۱۰ گام قبل می‌باشد. شبکه عصبی دارای دو لایه مخفی با ۱۰ و ۱۵ نرون و لایه خروجی با ۱ نرون است. این شمار نرون در لایه مخفی، با ارزیابی چندین شبکه عصبی انتخاب شدند. برای بررسی عملکرد شبکه‌های عصبی، مجموع قدر مطلق خطای پیش‌بینی شده (e)، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e = \sum_{i=1}^n |\hat{u}_g(i) - \ddot{u}_g(i)|$$

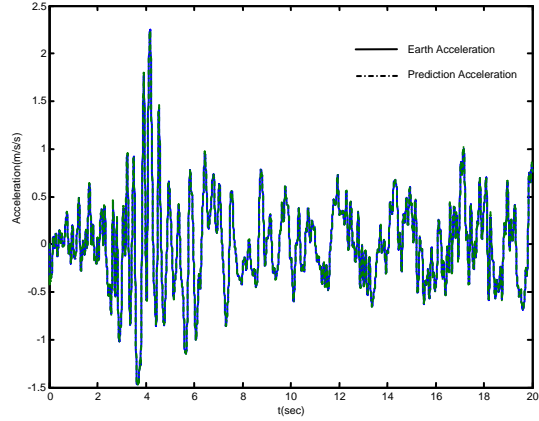
در این رابطه،  $\hat{u}_g(i)$ ، شتاب پیش‌بینی شده زلزله و  $\ddot{u}_g(i)$ ، شتاب واقعی زلزله در گام  $i$ -ام است. عامل e، برای چند شبکه عصبی با نرون‌های مختلف محاسبه و بر این اساس شبکه‌ای با ۱۰ و ۱۵ نرون در لایه‌ی مخفی، برای پیش‌بینی شتاب زمین انتخاب شد. نتیجه‌ها در جدول (۱) ارائه شده‌اند.



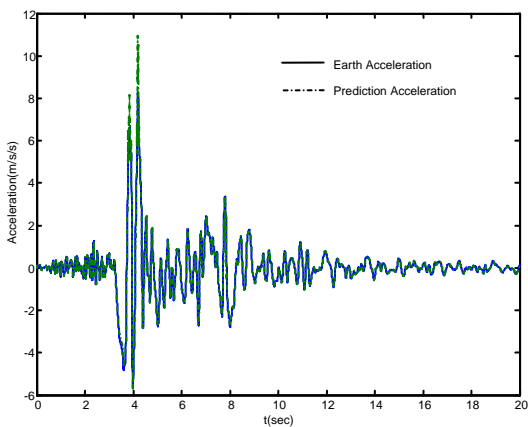
شکل 5 شبکه عصبی پرسپترون چند لایه پیش بین



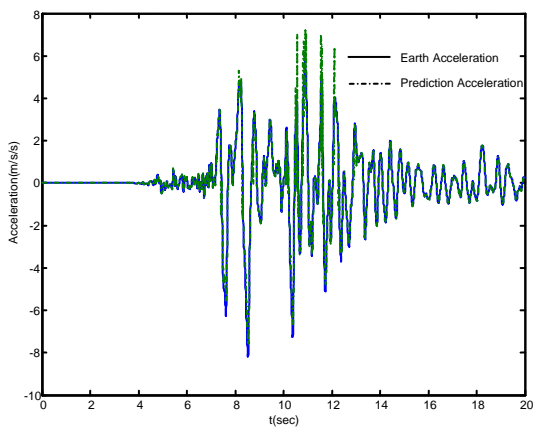
شکل 7 پیش بینی یک گام جلوتر شتاب نگاشت  
حچینو، توسط شبکه عصبی



شکل 6 پیش بینی یک گام جلوتر شتاب نگاشت  
السترو، توسط شبکه عصبی



شکل 9 پیش بینی یک گام جلوتر شتاب نگاشت  
کوبه، توسط شبکه عصبی



شکل 8 پیش بینی یک گام جلوتر شتاب نگاشت  
نورتریج، توسط شبکه عصبی

جدول ۲ میزان انحراف از معیار مقادیرهای پیش‌بینی شده شتاب نسبت به شتاب واقعی

شتاب‌نگاشت	$\frac{\ddot{u}_{g_{max}} - \hat{\ddot{u}}_{g_{max}}}{\ddot{u}_{g_{max}}} * 100$	$\frac{\ddot{u}_{g_{min}} - \hat{\ddot{u}}_{g_{min}}}{\ddot{u}_{g_{min}}} * 100$	انحراف = $\sqrt{\frac{\sum(\ddot{u}_g - \hat{\ddot{u}}_g)^2}{n}}$ از معیار $(\frac{m}{S^2})$
السترو (آموزش)	۰/۶	۵/۱۱	۰/۰۲۹۴
حجینو (آموزش)	۳/۰	۰/۱۱۵	۰/۰۱۱۷
نورتریج (آزمایش)	۱۰/۸	۱۴/۰	۰/۲۸۷
کوبه (آزمایش)	۱۲/۸	۳/۹۶	۰/۲۸۸

درجه یک (معادله فضای حالت)، نتیجه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{cases} \{\dot{U}\} = [A] \cdot \{U\} + [B] \{F\} \\ \{Y\} = [C] \cdot \{U\} + [D] \{F\} \end{cases} \quad (۴)$$

$$\begin{cases} \{U\} = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\}^T, \\ u_4 = \dot{u}_1, u_5 = \dot{u}_2, u_6 = \dot{u}_3 \\ \{\dot{U}\} = \{\dot{u}_1, \dot{u}_2, \dot{u}_3, \dot{u}_4, \dot{u}_5, \dot{u}_6\}^T, \\ \dot{u}_4 = \ddot{u}_1, \dot{u}_5 = \ddot{u}_2, \dot{u}_6 = \ddot{u}_3 \end{cases} \quad (۵)$$

$$\{F\} = \left\{ \ddot{u}_g, \frac{f}{m} \right\}^T, \quad f = [m] [\hat{u}_g(t - \Delta t)] \quad (۶)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ [-m^{-1}k] & [-m^{-1}c] \end{bmatrix}, \quad [B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (۷)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} [I] & [0] \\ [0] & [I] \\ [-m^{-1}k] & [-m^{-1}c] \end{bmatrix},$$

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (۸)$$

در این رابطه‌ها،  $f$  نیروی کنترل و  $d$  موقعیت نیروی کنترل می‌باشد. در معادله فضای حالت، مؤلفه‌های بردار  $U$ ، شامل تغییر مکان سه طبقه  $(u_1, u_2, u_3)$ ، سرعت

در این جا،  $\hat{u}_{g_{max}}$  پاسخ شبکه عصبی می‌باشد. با توجه به شکل‌های (۶) تا (۹) و جدول (۲)، می‌توان دریافت که شبکه عصبی توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی تغییر شتاب، در یک گام جلوتر دارد. بنابراین، می‌توان از این پیش‌بینی برای تولید نیروی کنترلی بهره گرفت.

### نمونه عددی دوم

در نمونه عددی دوم، یک قاب سه طبقه مورد بررسی قرار می‌گیرد. سقف‌های این سازه صلب فرض می‌شود. بنابراین، سازه سه درجه آزادی دارد. معادله حاکم و ویژگی‌های سازه به قرار زیر می‌باشند [16]:

$$[m] \{\ddot{u}(t)\} + [c] \{\dot{u}(t)\} + [k] \{u(t)\} = -[m] \{\ddot{u}_g(t)\} + [d] \{f(t - \Delta t)\}$$

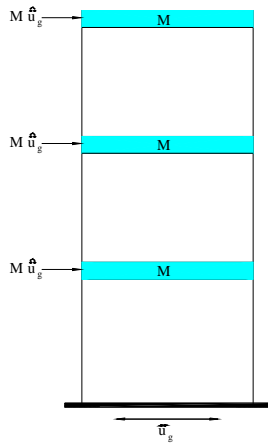
$$[m] = \begin{bmatrix} 31.285 & 0 & 0 \\ 0 & 31.285 & 0 \\ 0 & 0 & 31.285 \end{bmatrix} \frac{\text{kN.s}^2}{\text{m}} \quad (۱)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} 87424.6 & -52346.4 & 11771 \\ -52346.4 & 96368.7 & -51810.1 \\ 11771 & -51810.1 & 42525.1 \end{bmatrix} \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (۲)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} 12.207 & -1.827 & 1.966 \\ -1.827 & 14.57 & -0.088 \\ 1.966 & -0.088 & 13.95 \end{bmatrix} \frac{\text{kN-s}}{\text{m}} \quad (۳)$$

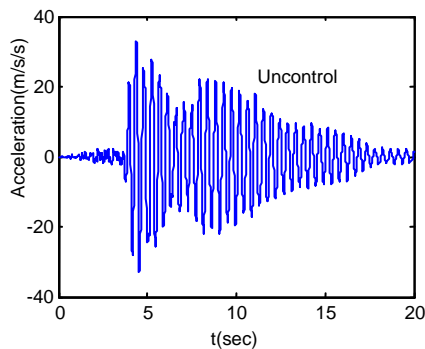
با تبدیل معادله حرکت سازه به معادله دیفرانسیلی

در جدول (۴) آمده است.

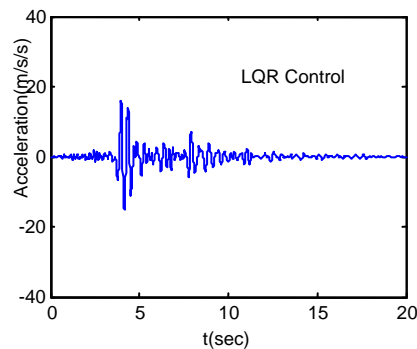


شکل ۱۰ الگوی سازه سه درجه آزادی

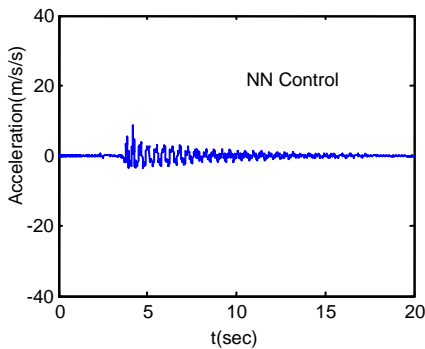
سه طبقه  $(u_4, u_5, u_6)$  و مولفه‌های بردار  $\dot{U}$ ، شامل سرعت سه طبقه  $(\dot{u}_1, \dot{u}_2, \dot{u}_3)$  و شتاب سه طبقه  $(\ddot{u}_4, \ddot{u}_5, \ddot{u}_6)$  می‌باشند. این نمونه عددی، در چهار حالت: کنترل نشده، کنترل با یک گام پیشین، کنترل با شبکه عصبی پیش‌بین و کنترل بهینه، تحلیل می‌شود. کنترل بهینه این نمونه عددی با استفاده از تنظیم کننده درجه دو خطی صورت می‌پذیرد. سازه مورد مطالعه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳)، به ترتیب، مقایسه میزان شتاب، سرعت و تغییر مکان طبقه سوم سازه را در چهار حالت و شکل (۱۴) نیروی کنترل را نشان می‌دهند. مقدار بیشینه شتاب، سرعت و تغییر مکان طبقه سوم سازه در جدول (۳) درج شده است. همچنین، میزان انحراف از معیار این کمیت‌ها



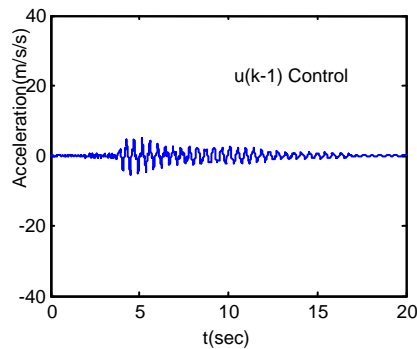
کنترل نشده



کنترل شده با روش LQR

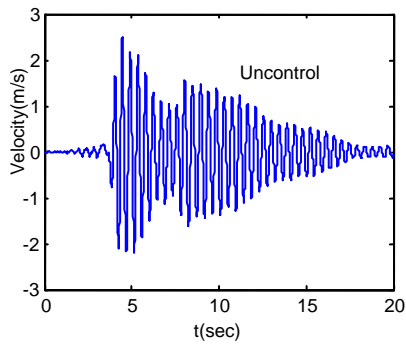


کنترل شده با شبکه عصبی

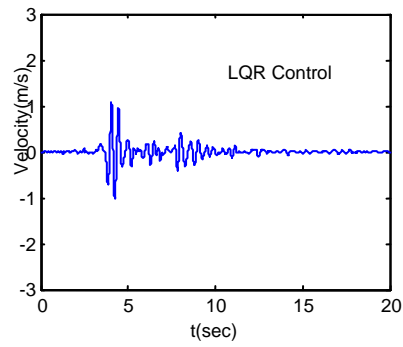


کنترل با گام پیشین شتاب زمین

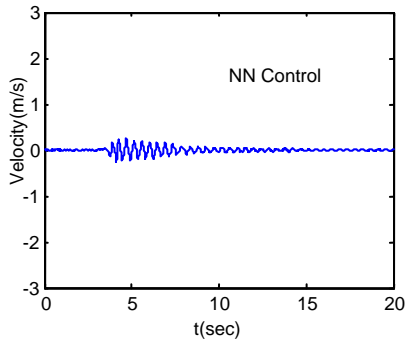
شکل ۱۱ شتاب طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج در چهار حالت



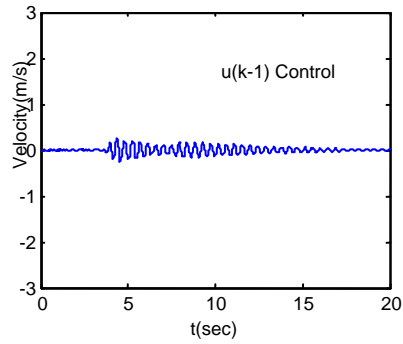
کنترل نشده



کنترل شده با روش LQR

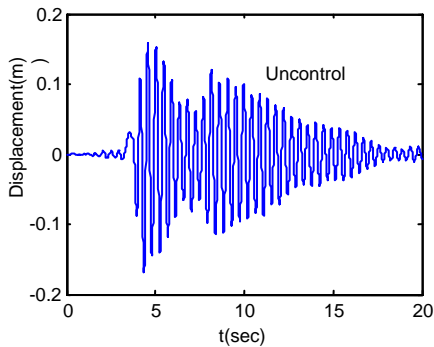


کنترل شده با شبکه عصبی

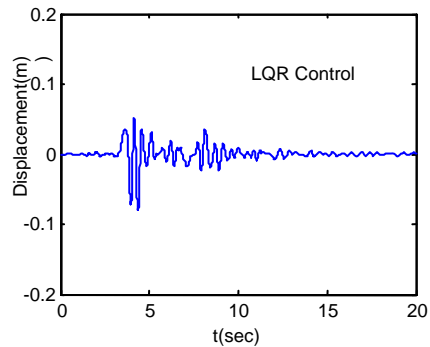


کنترل با گام پیشین شتاب زمین

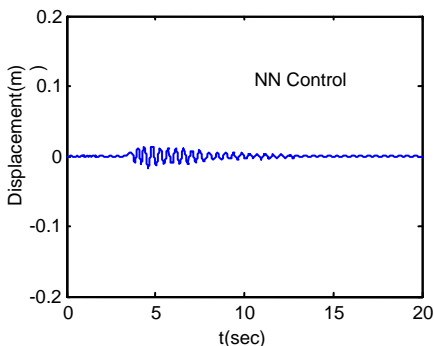
شکل ۱۲ سرعت طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج در چهار حالت



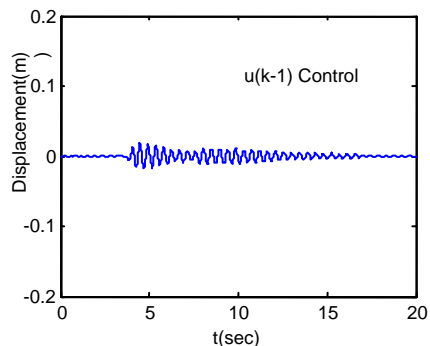
کنترل نشده



کنترل شده با روش LQR



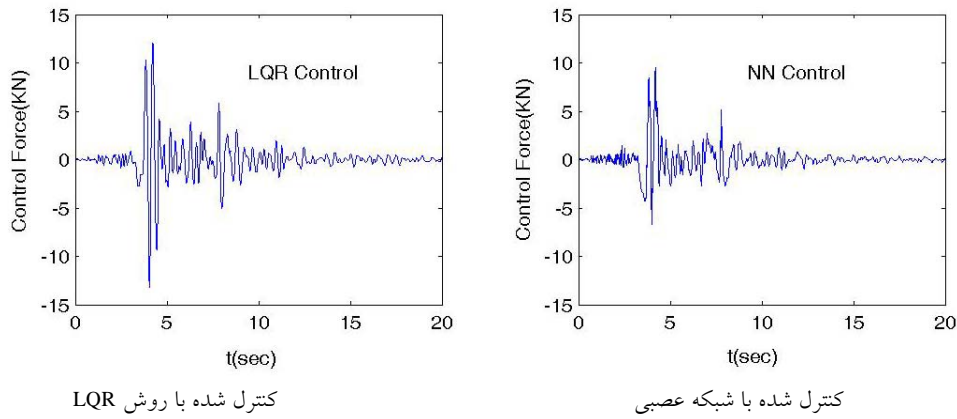
کنترل شده با شبکه عصبی



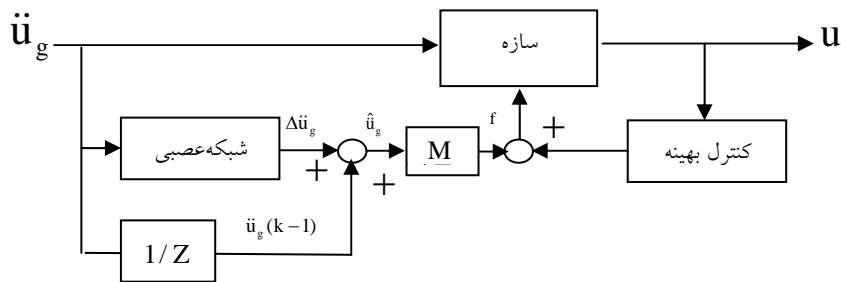
کنترل با گام پیشین شتاب زمین

شکل ۱۳ تغییر مکان طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج در چهار حالت





شکل ۱۴ نیروی کنترل طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریچ



شکل ۱۵ ساختار ترکیبی از کنترل بهینه و شبکه عصبی پیش‌بین

جدول ۳ پیشینه تغییر مکان، سرعت و شتاب طبقه سوم سازه، زیر اثر شتاب نگاشت نورتریچ

شیوه‌های کنترل	تغییر مکان (cm)	سرعت (cm/s)	شتاب (cm/s/s)
	پیشینه	پیشینه	پیشینه
کنترل نشده	۱۵/۸۷	۲۵۱	۳۳۰۶
بهینه	۵/۱۸	۱۰۶/۹	۱۵۷۹
با شبکه عصبی	۱/۴۲	۲۶/۴	۸۶۱/۷۱
با گام پیشین	۱/۸۸	۲۴/۸	۴۹۸/۳۵

جدول ۴ انحراف از معیار مقدارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب طبقه سوم سازه، زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج نسبت به مقدارهای مطلوب (صفر)

شیوه‌های کنترل	انحراف از معیار		
	تغییر مکان (cm)	سرعت (cm/s)	شتاب (cm/s/s)
کنترل نشده	۴/۹۹	۶۹/۸۵	۹۹۴/۰۷
بهینه (LQR)	۱/۲۳	۱۵/۷۷	۲۳۶/۳۷
باشبکه عصبی	۰/۴۰	۵/۸۴	۱۰۰/۹۵
با گام پیشین	۰/۵۲۰	۷/۴۵	۱۱۲/۵۳

می‌باشد. در پایداری مجانبی، پاسخ سازه از حد معینی فراتر نمی‌رود و در پایان، پاسخ سازه به مقدار مطلوب نزدیک می‌شود. با این کار، افزون بر تضمین پایداری ساختار کنترل، همگرایی آن نیز افزایش می‌یابد. این ویژگی، در نمونه‌هایی که در این بخش می‌آید، آشکار خواهد شد. اثبات پایداری کنترل بهینه در ساختار کنترل در دسترس است [19].

برای انجام چند کار عددی، می‌توان از مساله‌های بخش پیشین بهره جست. در این نمونه عددی، نیروی کنترل از مجموع نیروی کنترل بهینه و نیروی ناشی از شبکه عصبی پیش‌بین به دست می‌آید. بنابراین، ساختار کنترل پیشنهادی، به ساختار کنترل برگشتی تبدیل می‌شود. شکل (۱۵)، این ساختار کنترل را نشان می‌دهد.

### نمونه عددی سوم

اینک، به ارزیابی ساختار کنترل ترکیبی بر روی سازه سه درجه آزادی پرداخته می‌شود. نیروی کنترل هر طبقه، از مجموع نیروی حاصل از کنترل بهینه و کنترل با شبکه عصبی پیش‌بین به دست می‌آید. یادآوری می‌شود که در نمونه عددی دوم، به کارگیری کنترل با شبکه عصبی پیش‌بین برای کنترل سازه، دارای بهترین پاسخ بود. بنابراین، در این نمونه عددی، پاسخ‌های کنترل ترکیبی با پاسخ‌های کنترل با شبکه عصبی مقایسه می‌شود. شکل‌های (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) مقایسه دو ساختار کنترل و

می‌توان نیروی کنترلی را با کمک محرک‌های هیدرولیکی تولید کرد. این محرک‌ها توانایی دارند که نیرویی در حدود  $10^4$  نیوتن را دارند [18,17]. بیشینه‌ی نیروی مورد نیاز برای کنترل سازه در این مقاله  $13000$  نیوتن است.

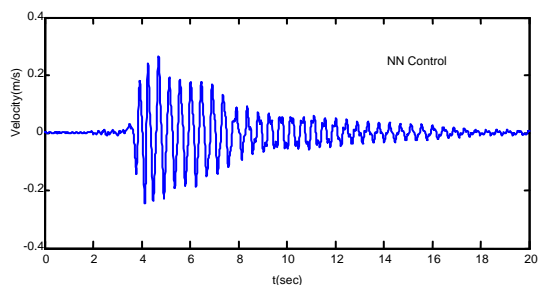
آن گونه که شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) و جدول‌های (۳) و (۴) نشان می‌دهند، تغییر مکان‌های سازه که یکی از مهمترین عامل در کنترل سازه می‌باشند، با راهکار پیشنهادی بیشتر به صفر نزدیک شده‌اند. بنابراین، کنترل با شبکه عصبی پیش‌بین شیوه مناسب‌تری برای کنترل پاسخ سازه می‌باشد.

### تضمین پایداری و بهبود عملکرد ساختار کنترل

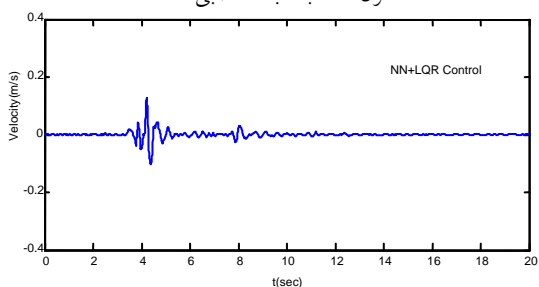
پایداری در ساختار کنترل دارای نقش مهمی می‌باشد. شیوه‌های مختلفی برای پایدار کردن ساختارهای کنترل به کار می‌رود. برای پایدار نمودن ساختارهای کنترل، که دارای شبکه عصبی‌اند، از تابع لیاپانوف و مانند آن استفاده می‌شود. این راهکارها، برای حالت کنترل برگشتی کاربرد دارند. به سخن دیگر، شیوه خاصی برای پایدار کردن ساختار کنترل، با شبکه عصبی در حالت کنترل رفت، وجود ندارد. بنابراین، برای تضمین پایداری ساختار کنترل پیشنهادی، می‌توان یک کنترل کننده بهینه به ساختار کنترل افزود. پایداری که کنترل کننده بهینه در ساختار کنترل ایجاد می‌کند، از نوع پایداری مجانبی

شکل (۱۹)، نیروی کنترل را نشان می‌دهند. مقدار بیشینه پاسخ‌ها در جدول (۵) و میزان انحراف از معیار پاسخ‌ها

نسبت به پاسخ مطلوب در جدول (۶) درج شده است.

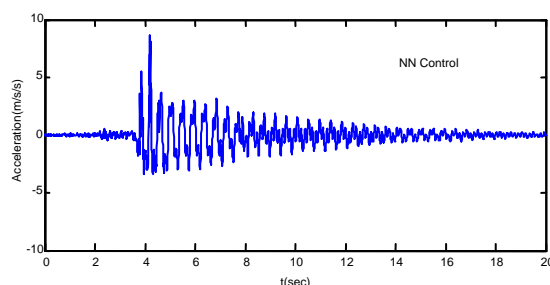


کنترل شده با شبکه عصبی

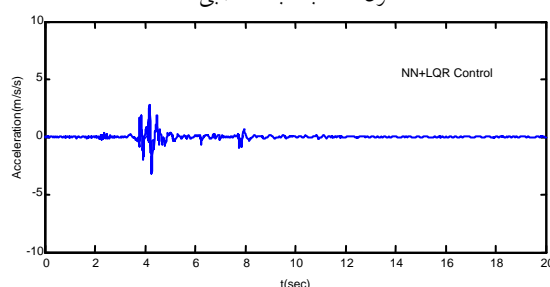


کنترل ترکیبی

شکل ۱۷ سرعت طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج در دو حالت

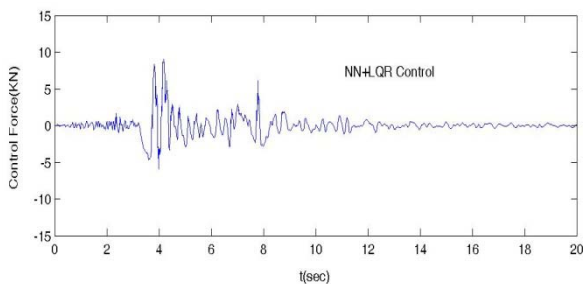


کنترل شده با شبکه عصبی

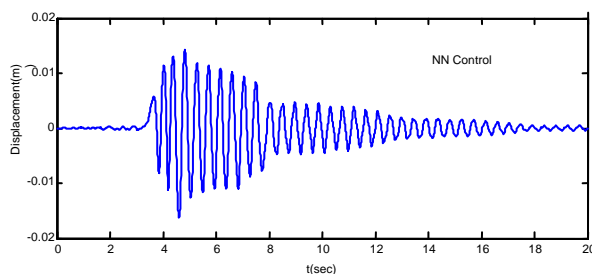


کنترل ترکیبی

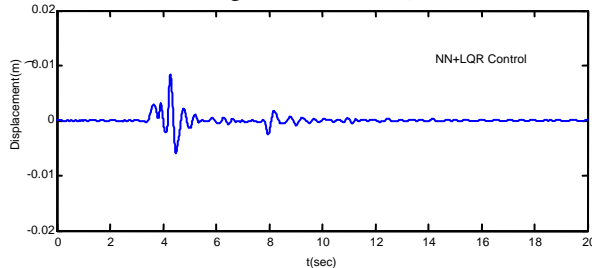
شکل ۱۶ شتاب طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج در دو حالت



شکل ۱۹ نیروی کنترل طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج



کنترل شده با شبکه عصبی



کنترل ترکیبی

شکل ۱۸ تغییر مکان طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج در دو حالت

جدول ۵ بیشینه‌ی تغییر مکان، سرعت و شتاب طبقه سوم سازه، زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج

شیوه‌های کنترل	تغییر مکان	سرعت	شتاب
	(cm)	(cm/s)	(cm/s/s)
	بیشینه	بیشینه	بیشینه
با شبکه عصبی + (LQR)	۰/۵۵	۱۲/۵۷	۲۷۳/۹۴
با شبکه عصبی	۱/۴۲	۲۶/۴	۸۶۱/۷۱

جدول ۶ انحراف از معیار مقدارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب طبقه سوم سازه، زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج نسبت به مقدارهای مطلوب (صفر)

شیوه‌های کنترل	انحراف از معیار		
	تغییر مکان	سرعت	شتاب
	(cm)	(cm/s)	(cm/s/s)
با شبکه عصبی + (LQR)	۰/۰۹۰۹۹	۰/۱۲۸	۲۴/۸۹
با شبکه عصبی	۰/۴۰	۵/۸۴	۱۰۰/۹۵

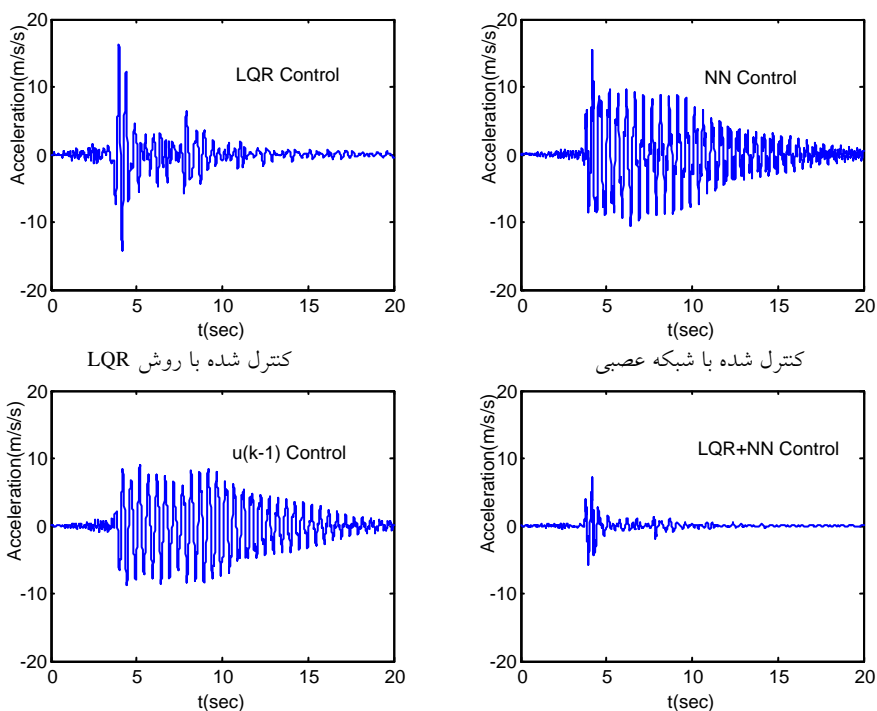
کنترل را بازسازی نمود. در این بخش، به اثر تغییرهای کم مشخصه‌های سازه در کنترل پرداخته می‌شود. در شیوه پیشنهادی، به دلیل بهره‌نجام از پاسخ سازه برای ایجاد نیروی کنترل، تغییر در میزان سختی و میرایی، تاثیری در کنترل سازه ندارد. تنها جرم سازه، در ایجاد نیروی کنترل نقش موثری دارد. بنابراین، تغییر در جرم سازه، سبب کاهش کارآمدی ساختار کنترل می‌شود. در نمونه عددی پیشین، جرم سازه به میزان ۲۰ درصد کاهش می‌یابد تا اثر آن بر روی پاسخ سازه مشخص شود. شکل‌های (۲۰)، (۲۱) و (۲۲)، به ترتیب، شتاب، سرعت و تغییر مکان سازه را نشان می‌دهند. در جدول (۷)، مقدارهای بیشینه شتاب، سرعت و تغییر مکان در چهار حالت کنترل شده با روش LQR، کنترل شده با شبکه عصبی، کنترل شده توسط گام پیشین شتاب زمین و کنترل ترکیبی مقایسه

با توجه به نمونه‌های عددی این بخش، می‌توان به توانایی ساختار کنترل ترکیبی پی برد. ساختار کنترل ترکیبی هر سه مولفه شتاب، سرعت و تغییر مکان را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. بنابراین، این ساختار کنترل را می‌توان برای بیشتر سازه‌ها به کار گرفت.

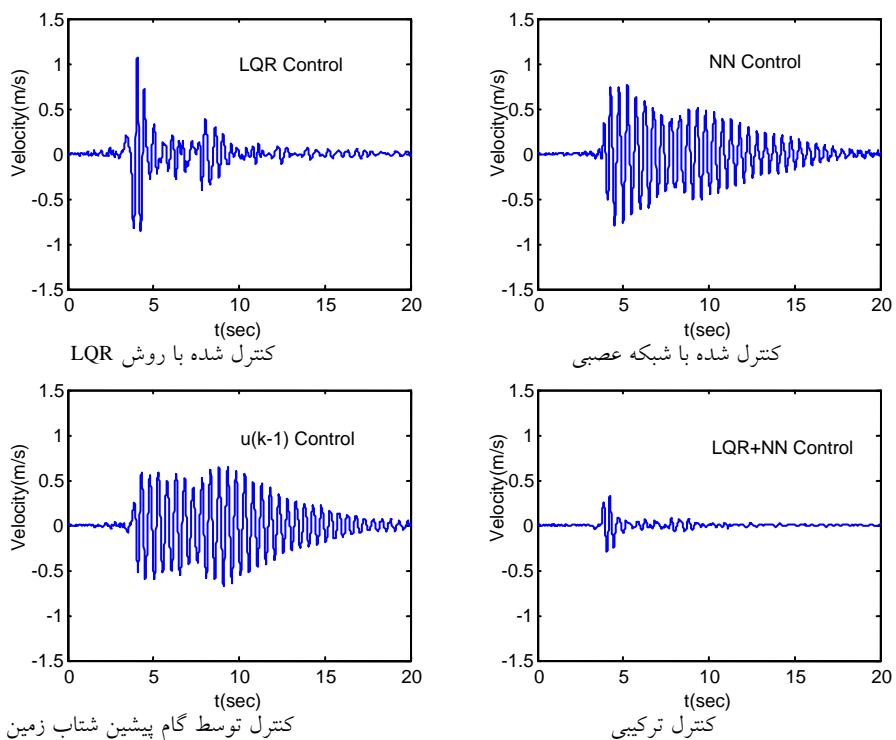
#### اثر تغییر مولفه‌های سازه بر روی ساختار کنترل

خطاهای اجرایی، یکی از بارزترین عامل تغییر مشخصه‌های سازه می‌باشد. عامل دیگر، وقوع زمین لرزه‌های متوسط و پس لرزه‌ها است. این تغییر سبب می‌شود که مشخصه‌های سازه، که برای طراحی ساختار کنترلی به کار می‌رود، با حالت واقعی آن، مطابقت نداشته باشد. اگر تغییر مشخصه‌های سازه زیاد باشد، باید با تخمین خسارت میزان تغییرهای آن را وارد کرد و سپس ساختار

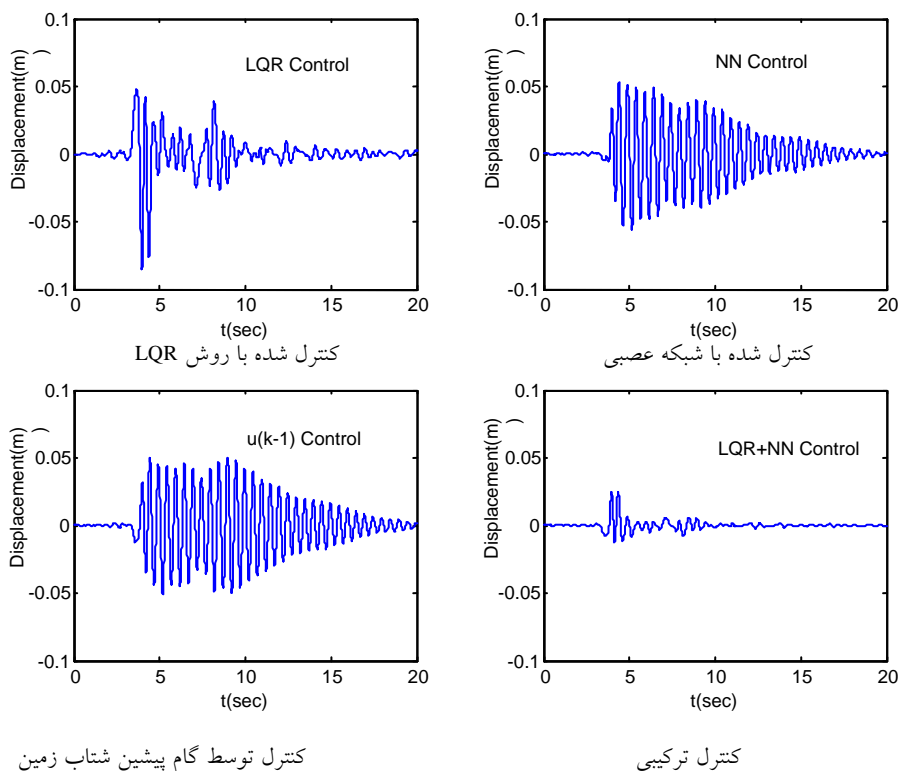
شده است. همچنین، میزان انحراف از معیار برای این چهار حالت در جدول (۸)، نشان داده شده است.



شکل ۲۰ شتاب طبقه سوم سازه، زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج با کاهش ۲۰ درصد جرم سازه در چهار حالت کنترل ترکیبی، کنترل شده با شبکه عصبی، کنترل شده با روش LQR، کنترل توسط گام پیشین شتاب زمین



شکل ۲۱ سرعت طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج با کاهش ۲۰ درصد جرم سازه



شکل ۲۲ تغییر مکان طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج با کاهش ۲۰ درصد جرم سازه در چهار حالت

جدول ۸ انحراف از معیار مقادیرهای تغییر مکان، سرعت و شتاب طبقه سوم سازه، زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج نسبت به مقادیرهای مطلوب (صفر)، با ۲۰ درصد کاهش جرم سازه

شیوه‌های کنترل	انحراف از معیار		
	تغییر مکان (cm)	سرعت (cm/s)	شتاب (cm/s/s)
بهبود	۱/۳۳	۱۵/۴	۲۱۷/۸۸
با شبکه عصبی	۱/۸۵	۲۳/۶	۳۳۳/۱۵
با گام پیشین	۲/۰۰	۲۵/۱۷	۳۲۷/۱۵
با شبکه عصبی + (LQR)	۰/۳۶۰	۴/۴۶	۶۶/۹

جدول ۷ بیشینه تغییر مکان، سرعت و شتاب طبقه سوم سازه، زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج با ۲۰ درصد کاهش جرم سازه

شیوه‌های کنترل	تغییر مکان (cm)	سرعت (cm/s)	شتاب (cm/s/s)
	بیشینه	بیشینه	بیشینه
بهبود	۴/۷۹	۱۰۶/۱۵	۱۶۱۰
با شبکه عصبی	۵/۳۱	۷۷	۱۵۴۰
با گام پیشین	۵/۰۳	۶۵	۸۹۳
با شبکه عصبی + (LQR)	۲/۴۴	۳۲/۷	۷۲۰

کنترل کننده بهینه در ساختارکنترل و ایجاد یک سامانه‌ی کنترل ترکیبی، افزون بر تضمین پایداری سازه، عملکرد سامانه کنترل را بهتر می‌سازد. به سخن دیگر، روش پیشنهادی از یک شبکه‌ی عصبی برای ایجاد نیروی کنترل مناسب‌تر و یک کنترل کننده بهینه برای پایداری بیشتر ساختار کنترل بهره می‌گیرد. همچنین، اثرهای نامطوب تغییر جرم سازه، که در هنگام زمین لرزه های متوسط و پس لرزه‌ها ایجاد می‌شود، نیز کاهش می‌یابد. نمونه‌های عددی بروشنی توانایی این شیوه را آشکار کردند. تنها کاستی روش پیشنهادی نویسندگان، نیاز به استفاده حسگر و محرک در همه درجه‌های آزادی برای اندازه‌گیری پاسخ سازه و ایجاد نیروی مناسب کنترلی می‌باشد.

### نشانه‌ها

$u$	تغییر مکان سازه
$\ddot{u}_g$	شتاب زمین
$\hat{u}_g$	شتاب پیش‌بینی شده
$\ddot{u}_g(k-n)$	شتاب زمین در $n$ گام پیشین
$b$	بایاس
$w$	وزن‌های شبکه عصبی
$t$	زمان
$f$	تابع شبکه عصبی
$1/z$	نماد دیرکرد زمان
$n$	شمار داده‌ها

با توجه به شکل‌های (۲۰) تا (۲۲) و جدول‌های (۷) و (۸)، می‌توان دریافت که کاهش وزن سازه، اثر نامطلوبی در رفتار سازه با کنترل با شبکه عصبی پیش‌بین و کنترل با گام پیشین دارد. این وضعیت به دلیل این است که در این دو حالت، ساختار کنترل، از نوع ساختار کنترلی رفت می‌باشد. به دیگر سخن، برای تولید نیروی کنترلی از پاسخ سازه استفاده نمی‌شود. ساختار کنترلی متوجه کاهش جرم سازه نشده و بیش از مقدار نیاز به سازه نیرو وارد می‌کند. بنابراین، تغییر مکان‌های افزایش یافته، خلاف جهت حرکت سازه در حالت کنترل نشده می‌باشد. در کنترل ترکیبی، با توجه به اینکه برای تولید نیروی کنترلی، از ویژگی‌های اولیه سازه و پاسخ سازه استفاده می‌شود، اثر کاهش وزن در کنترل سازه کمتر است. در این حالت، پاسخ سازه در تولید نیروی کنترل نقش دارد و ساختار کنترل، کاهش جرم سازه را تا حدودی متوجه می‌شود. به همین دلیل، اثر کاهش جرم سازه در این ساختار کنترل کمتر می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ساختار کنترل ترکیبی، شیوه مناسب‌تری برای کنترل سازه است.

### نتیجه‌گیری

به کار بردن یک شبکه‌ی عصبی پیش‌بین شتاب زمین، راهکار پیشنهادی در این مقاله می‌باشد. این شیوه در کمینه کردن مولفه‌های پاسخ سازه موفق می‌باشد، ولی به هیچ وجه پایداری سازه را تضمین نمی‌کند. با افزودن یک

### مراجع

- Hong-Nan L. and Hao Y., "System Identification of Dynamic Structure by the Multi-branch BPNN", *Neurocomputing*, 70, pp. 835-841, (2007).
- Ghaboussi. J., Garrett Jr. J.H. and Wu X., "Knowledge-Based Modeling of Material Behavior with Neural Networks.", *J. Engineering Mechanics*, 117, (1), pp. 132-153, (1991).
- Ghaboussi, J. and Nikzad K., "Actuator Dynamics and Delay Compensation using Neurocontrols", *ASCE, J. Engineering Mechanics*, 122(10), pp. 966-975, (1996).
- Hosuner, G.W., Bergman C.A., Caughey T.K., Soong T.T., Spenser, B.F., Chassiakos A.G., Claus R.O., Masri S.F., Skelton R.E. and Tao J.T.P., "Structural Control: Past, Present, and Future", *J. Engineering*

- Mechanics*, 123(9), pp 897-962, (1997).
5. Patino, H.D. and Derong, L., "Neural Network-Based Model Reference Adaptive Control System", *IEEE Transaction on System. Part B: Cybernetics*, 30(1), (2000).
  6. Chen H.M., Tsai K.H., Qi G.Z. and Yang, J.C.S., "Neural Network for Structural Control", *ASCE, J. Computing in Civil Engng*, 9, pp. 168-176, (1995).
  7. Ghaboussi, J. and Joghataie, A., "Active Control of Structure using Neural Network", *ASCE, J. Engineering Mechanics*, 121(4), pp. 555-567, (1995).
  8. Ghaboussi, J. and Bani-Hani, K., "Nonlinear Structure Control using Neural Network", *ASCE, J. Engineering Mechanics*, 124(3), pp. 319-327, (1998).
  9. Ghaboussi, J. and Bani-Hani, K., "Neural Network for Structure Control of a Benchmark Problem ,Active Tendon System", *J. Earthquake Engng. Structure, Dyn.* 27, pp. 1225-1245, (1998).
  10. Yu-Ao, H. and Jianjun, W., "Control of Structural Seismic Response by Self-Recurrent Neural Network(SRNN)", *J. Earthquake Engng. Structure, Dyn.* 27, pp. 641-648, (1998).
  11. Dong-Hyawn K. and In-won L., "Neural-Control of Seismically Excited Steel Structure Through Sensitivity Evaluation Scheme", *J. Earthquake Engng. Structure*, 30, pp. 1361-1377, (2001).
  12. Ratneshwar J. and Chengli H., "Neural-network-based Adaptive Predictive Control for Vibration Suppression of Smart Structures", *Smart Mater. Struct.*, 11, p. 909, (2002).
  13. Rao M. M. and Datta T. K., "Modal Seismic Control of Building Frames by Artificial Neural Network", *ASCE, J. Computing in Civil Engng*, 20(1), pp. 69-73, (2006).
  14. Rezaiee-Pajand M., Akbarzadeh-T M.-R. and Nikdel A., "Direct Adaptive Neurocontrol of Structures under Earth Vibration", *Computing in Civil Engineering*, 23(5), pp. 299-307, (2009).
  15. MATLAB, The Math Works, Inc. Natick, Massachusetts, (2000).
  16. Chung L.L., Lin R.C., Soong T.T. and Reinhorn, A.M., "Experimental Study of Active Control for MDOF Seismic Structures", *J. Engineering Mechanics*, 115(9), pp. 1609-1627, (1989).
  17. Aaron S. B. and Yang H.T.Y., "Neural Networks for Multi-objective Adaptive Structural Control", *Journal of Structural Engineering*, 127(2), pp. 203-210, (2001).
  18. Dorey, A.P. and Moore, J.H., "Advances in actuators, Institute of Physics Publishing", (1995).
  19. Connor, J., "Introduction to structural Motion on Control." Massachusetts Institute of Technology, (2001).