

## Assessing the Efficiency of an Active Viscous Damper in Near-Field and Far-Field Earthquakes

Ali Jalaeefar<sup>1\*</sup>, Mahdi Kiani<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad university, North Tehran branch, Tehran, Iran

2- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Babol Noushiravani University, Babol, Iran

### ABSTRACT

The present article involves evaluating the efficiency of an active viscous damper in controlling vibrations caused by near and far field earthquakes. Being installed on chevron bracing systems, the damper is able to provide necessary controlling forces to diminish vibration amplitude up to its' saturation limit. Many researchers have worked on the concept of seismic active control under far field waves. But the efficiency of this system is not guaranteed in near field ones due to time delay phenomenon. Pulse and shock entity of near field seismic waves leads to decreasing active control effects and the present research also proves the fact. A computer based algorithm is developed using Newmark instantaneous optimal control method in MATLAB software. The performance of this code is validated and evaluated based on three different reference problems. Then the analysis results of a 7-storey structure are calculated based on the code. The analyses are developed using both controlled and uncontrolled states. Also near field and far field earthquake records are used in this process and the results are compared in different tables and graphs. Based on the results, it seems that active control systems in spite of their effectiveness in near field earthquakes, needs necessary scheming and changes in the process.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 11 August 2019

**Revise Date:** 24 February 2020

**Accept Date:** 07 March 2020

### Keywords:

Active viscous damper;  
Instantaneous optimal control;  
Near field earthquake;  
Far field earthquake;  
Acceleration;  
Velocity;  
Displacement

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2020.197694.1927

\*Corresponding author: Ali Jalaeefar

Email address: : ali\_jalaeefar@yahoo.com

## ارزیابی کارآیی میراگر ویسکوز فعال در زلزله‌های حوزه دور و نزدیک

علی جلائی فر<sup>۱\*</sup>، مهدی کیانی<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، مازندران

### چکیده

این پژوهش به بررسی کارآیی سیستم میراگر ویسکوز فعال (AVDS) در کنترل ارتعاشات ناشی از زلزله‌های حوزه دور و نزدیک پرداخته است. این میراگر که قابلیت نصب در المان‌های مهاربندی شورون را دارد، می‌تواند نیروی کنترلی مورد نیاز برای کاهش دامنه‌ی ارتعاش سازه را تا رسیدن به حد اشباع مشخصی تامین نماید. عملکرد کنترل فعال در کاهش اثرات ناشی از زلزله حوزه دور در مطالعات مختلفی بررسی شده است. اما کارآیی این سیستم در کنترل ارتعاشات ناشی از زلزله حوزه دور با توجه به پدیده‌ی تاخیر زمانی مورد تردید است. ماهیت ضربه‌ای و پالس مانند موج زلزله در نزدیکی گسل باعث کاهش اثرگذاری کنترل فعال در سازه می‌گردد. که نتایج حاصل از این پژوهش نیز مؤید این مطلب است. در این روند یک کد کامپیوتری در نرم افزار متلب و بر اساس الگوریتم کنترل بهینه‌ی لحظه‌ای نیومارک ارائه شده است. عملکرد این کد بر اساس سه مساله‌ی مختلف صحت سنجی و بررسی شده است. سپس نتایج تحلیل دینامیکی سازه‌ای ۷ طبقه بر اساس این کد محاسبه و در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده و با استفاده از رکوردهای زلزله حوزه دور و نزدیک ارائه شده است. بر اساس این نتایج به نظر می‌رسد استفاده از سیستم‌های کنترل فعال هرچند در زلزله‌های حوزه نزدیک نیز مؤثر هستند، اما به کارگیری تمهیداتی در این روند ضروری است.

کلمات کلیدی: میراگر ویسکوز فعال، کنترل بهینه لحظه‌ای، زلزله حوزه نزدیک، زلزله حوزه دور، شتاب. سرعت، جابجایی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
10.22065/JSCE.2020.197694.1927	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت	
doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.197694.1927	۱۴۰۰/۰۶/۳۰	۱۳۹۸/۱۲/۱۷	۱۳۹۸/۱۲/۱۷	۱۳۹۸/۱۲/۰۵	۱۳۹۸/۰۵/۲۰	
			علی جلائی فر		*نویسنده مسئول:	
			ali_jalaeefar@yahoo.com		پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

زمانی که سازه در معرض زلزله یا باد قرار می‌گیرد، متحمل لرزش یا تغییر شکل شده و دچار خسارت می‌گردد. به منظور مقابله با اثرات مخرب نیروهای دینامیکی، روش‌هایی هم‌چون کاهش انرژی انتقال یافته به سازه، افزایش سختی سازه، افزایش شکل‌پذیری سازه و اتلاف انرژی ورودی به سازه مطرح می‌باشند که به صورت عمومی از این روش‌ها به عنوان "کنترل" یاد می‌شود. هدف از کنترل سازه، کاهش نوسانات آن از طریق به کارگیری مکانیزم‌های خاص کنترلی و اعمال نیروهای کنترلی به سازه است.

بر اساس نیاز به انرژی خارجی، کنترل سازه را می‌توان به چهار نوع کنترل غیرفعال<sup>۱</sup>، فعال<sup>۲</sup>، ترکیبی<sup>۳</sup> و نیمه فعال<sup>۴</sup> تقسیم نمود [۱]. سیستم‌های کنترل غیرفعال با تغییر شکل سازه تحریک شده و عمل می‌نمایند. هیچ نیرو یا انرژی خارجی در این نوع از کنترل به کار نمی‌رود و ادوات کنترل به همراه سازه‌ی اصلی حرکت می‌کنند. در کنترل فعال برای کاهش پاسخ سازه، نیروی خارجی توسط ادوات و تجهیزات بیرونی بر سازه اعمال می‌گردد. فعال‌سازی نیروهای خارجی بر مبنای ارزیابی تحریک خارجی و یا پاسخ‌های سازه صورت می‌گیرد. بدین منظور حس‌گرهایی در نقاط مختلف سازه برای رصد پاسخ‌های آن به کار می‌روند. این حس‌گرها سیگنال‌های آنالوگ را به دیجیتال تبدیل کرده و آن‌ها را در اختیار سیستم پردازش داده‌ها قرار می‌دهند. سیستم پردازش نیز ادوات اعمال نیروی خارجی را با الگوریتمی خاص برای کنترل پاسخ سازه فعال می‌نماید. [۱]

این سیستم‌ها معمولاً تا زمانی که پاسخ سازه چندان قابل توجه نیست فعال نمی‌شوند. زمانی که ارتعاش سازه تقویت می‌شود، سیستم کنترل، پردازش سیگنال احساس شده را آغاز کرده و بر اساس الگوریتم‌های کنترلی به محرکها<sup>۵</sup> فرمان عکس‌العمل می‌دهد. محرک‌ها نیز به منظور مقابله با تحریک خارجی، نیروهای کنترلی را به سازه اعمال می‌کنند. سیستم‌های کنترل فعال معمولاً به وسیله اعمال انرژی خارجی و یا تغییر خواص میرایی یا سختی سیستم، پاسخ‌های سازه را کنترل می‌نمایند. یک سیستم کنترل فعال شامل تعدادی حس‌گر<sup>۶</sup>، یک کنترل‌کننده کامپیوتری و تعدادی محرک کنترلی است. حس‌گرها تحریکات بیرونی، پاسخ سازه یا هر دو را اندازه‌گیری می‌کنند. کنترل‌کننده کامپیوتری، اطلاعات اندازه‌گیری شده‌ی ورودی را پردازش و با استفاده از الگوریتم کنترل از پیش‌آماده شده، نیروهای کنترل مورد نیاز را محاسبه می‌کند. محرک‌های کنترل، سیگنال‌های فرمان را از کنترل‌کننده کامپیوتری دریافت و نیروهای کنترلی مورد نیاز را ایجاد می‌کنند. انرژی این محرک‌ها توسط منبع خارجی تامین می‌شود. [۲]

هزاوه و همکاران در سال ۲۰۱۷ میراگر ویسکوز نیمه فعال و یک‌جهته‌ای را جهت کنترل ارتعاشات سازه معرفی نمودند. رفتار این میراگر تحت اثر بارگذاری‌های مختلفی به صورت آزمایشگاهی بررسی گردید. نتایج قابل قبول این آزمایشات معرف وسیله‌ای کارآمد و نسبتاً ارزان جهت کنترل ارتعاشات سازه با رفتار چرخه‌ای پایدار است [۳]. یونس پور و همکاران در سال ۲۰۱۴ با الگوریتمی جدید بلوک ضربه‌ای تحریک را در میراگر جرمی فعال کنترل نمودند. این الگوریتم در پی کاهش هزینه محاسبات بوده و نتایج حاصل به خوبی موید تامین این هدف است. در این راستا، سازه‌ی برشی ۱۰ طبقه‌ای مجهز به میراگر جرمی فعال به صورت عددی مدلسازی و نتایج آن در حالت کنترل شده و کنترل نشده با الگوریتم کنترل خطی مقایسه شده است [۴]. یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ عملکرد میراگر جرمی فعال را در کنترل ارتعاشات سازه با الگوریتم بازخورد شتاب منفی بررسی نمودند. این الگوریتم ابتدا بر روی یک سیستم یک درجه آزادی به کار گرفته شد. سپس این بررسی به روش مودال چندگانه با یک جرم فعال نیز تعمیم داده شد و کارایی این روش در کنترل ارتعاشات سازه با مودهای نوسانی متعدد مشاهده گردید [۵]. فوتی در سال ۲۰۱۴ عملکرد دو گروه از قاب‌های خمشی ۵ طبقه را که با میراگر اصطکاکی تجهیز شده بودند در زلزله حوزه دور و نزدیک مقایسه نمود [۶]. نادرپور و همکاران نیز در سال ۲۰۱۹ به مقایسه عملکرد سازه‌های بلند مجهز به جداساز لرزه‌ای و میراگر جرمی در زلزله دور و نزدیک پرداختند. نتایج هر دو پژوهش حاکی از تفاوت رفتار سازه در این دو نوع زلزله بود. [۷]

<sup>1</sup> Passive control

<sup>2</sup> Active control

<sup>3</sup> Hybrid control

<sup>4</sup> Semi active control

<sup>5</sup> Actuators

<sup>6</sup> Sensor

در این پژوهش به بررسی کارایی سیستم میراگر ویسکوز فعال<sup>۷</sup> (AVDS) در کنترل ارتعاشات ناشی از زلزله‌های حوزه‌ی دور و نزدیک پرداخته می‌شود.

### ۱-۱- میراگر ویسکوز فعال (AVDS)

سیستم میراگر ویسکوز فعال که در سال ۲۰۰۱ میلادی توسط ریپاکوف [۸] ابداع شده، می‌تواند با صرف انرژی خارجی ناچیز، نیروی کنترلی را بر سازه اعمال کند. تنها محدودیت این مکانیزم وجود یک حد اشباع برای نیروی کنترل می‌باشد. هر سیستم میراگر ویسکوز فعال مطابق شکل ۱، دارای اجزایی به شرح زیر می‌باشند:

- محفظه استوانه‌ای.
  - میله فولادی برای انتقال نیروی فعال به سازه.
  - شیار ایجاد شده روی استوانه که نقش ریل را برای حرکت دورانی سیستم ایفا می‌کند.
  - دو میراگر مایع.
  - سیستم اصلی برای اعمال کنترل فعال، به طوری که با تغییر طول این عضو که به طور فعال صورت می‌گیرد، سیستم بطور فعال عمل کرده و در هر لحظه نیروی دلخواه را (با وجود حد اشباع) به سازه اعمال می‌کنند.
  - سیستم اتصال میراگرهای مایع به عضو فعال سیستم برای قرارگیری و حرکت روی ریل.
- این میراگر می‌تواند با استفاده از بادبندهای  $\Lambda$  شکل در سازه نصب گردد، به طوری که میله‌ی محرک میراگر به دیافراگم طبقه بالایی متصل می‌باشد و پایه‌های بادبند روی دیافراگم کف مهار شده‌اند.

بعد از تعیین مقدار نیروی کنترلی مورد نیاز توسط یکی از الگوریتم‌های کنترل فعال، این میراگر وظیفه‌ی تامین این نیرو را بر عهده خواهد داشت. با تغییر زوایای دو میراگر ویسکوز درون محفظه استوانه‌ای، مقدار نیرویی که توسط این میراگر تولید می‌شود را می‌توان با نیروی کنترلی مورد نیاز تنظیم نمود.

نیروی موجود در هر میراگر ویسکوز خطی متناسب با سرعت حرکت پیستون در محیط ویسکوز و مطابق رابطه ۱ می‌باشد [۸].

$$F_{VD} = C_{VD} |\dot{u}(t)|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{u}(t)) \quad (1)$$

در این رابطه،  $F_{VD}$  نیروی تولید شده توسط هر یک از میراگرهای ویسکوز خطی،  $C_{VD}$  مختصه میراگر ویسکوز،  $\dot{u}(t)$  سرعت پیستون در محیط ویسکوز و  $\alpha$  توان سرعت متغیر بین ۰/۵ تا ۲ می‌باشند.

تغییر زاویه بین دو میراگر ویسکوز درون محفظه استوانه‌ای در واقع مربوط به عملکرد فعال این میراگر می‌باشد. این تغییر زاویه توسط قطعه شماره ۵ در شکل ۱ صورت می‌پذیرد. اما میزان تغییر این زاویه و به دنبال آن نیرویی که در این میراگر تولید می‌شود دارای محدودیت می‌باشد. بیشینه نیرویی که در میراگر AVDS قابل تولید می‌باشد، در حالتی است که زاویه  $\theta$  در شکل ۱ برابر ۹۰ درجه باشد. در این حالت بیشینه نیرو برابر  $2F_{VD}$  خواهد بود. حال اگر نیروی کنترلی مورد نیاز که از طریق الگوریتم کنترل فعال محاسبه می‌شود را برابر  $u(t)$  در نظر بگیریم، در نهایت نیرویی که توسط میراگر AVDS قابل تولید است مطابق رابطه ۲ می‌باشد [۸]:

$$u_r = \min\{u(t), 2F_{VD}\} \quad (2)$$

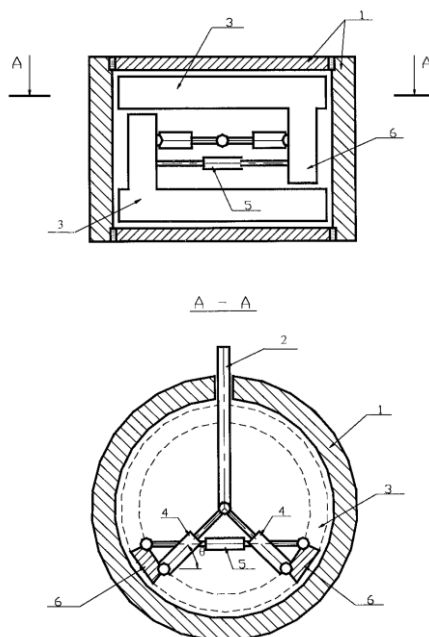
با توجه به این رابطه قابل مشاهده است که اگر نیروی کنترل مورد نیاز بیش از مقدار بیشینه میراگر باشد، این مقدار بیشینه به عنوان نیروی کنترل از سوی میراگر به سازه اعمال خواهد شد. از سوی دیگر می‌توان دریافت که ظرفیت این میراگر به مشخصات میراگرهای

<sup>7</sup> Active viscous damping system

ویسکوز به کار رفته در میراگر AVDS بستگی دارد. به این ترتیب زاویه  $\theta$  که زاویه بین میراگر و صفحه‌ی عمود بر میله‌ی محرک می‌باشد، به شرح زیر است [۸]:

$$\sin^2 \theta = \left| \frac{u_r}{2F_{VD}} \right| \quad (3)$$

به این ترتیب در هر لحظه با استفاده از خروجی‌های الگوریتم کنترلی می‌توان زوایای درون میراگر را برای تولید نیروی مورد نیاز تنظیم نمود.



شکل ۱- جزئیات میراگر AVDS [۸]

## ۱-۲- الگوریتم کنترل بهینه لحظه‌ای<sup>۸</sup> بر مبنای روش نیومارک

معادله‌ی حرکت یک سیستم یک درجه آزادی کنترل شده با تعداد  $m$  وسیله‌ی کنترل، در بازه زمانی  $(K-1)\Delta t$  و  $K\Delta t$  در حالت کلی (الاستیک یا غیرالاستیک) به شکل زیر قابل بیان است [۸ و ۹]:

$$M\ddot{X}_{k-1} + F_{DK-1} + F_{SK-1} = Mi\ddot{X}_{gk-1} + Du_{k-1} \quad (4)$$

که در آن :

$\ddot{X}_g$  شتاب تحریک ورودی،  $X$  و  $\dot{X}$  به ترتیب بردارهای جابجایی، سرعت و شتاب،  $M$  ماتریس جرم  $n \times n$  و  $F_D$  و  $F_S$  بردار نیروهای میرایی و سختی،  $D$  ماتریس  $n \times m$  نشان‌دهنده‌ی محل کنترل‌کننده‌ها،  $i$  بردار تاثیر  $n$  بعدی شتاب تحریک ورودی و  $k$  نیز شمارنده‌ی کنترل‌کننده‌ی بازه‌های زمانی می‌باشند. با کسر دو معادله در بازه زمانی  $(K-1)\Delta t$  و  $K\Delta t$  از یکدیگر می‌توان نوشت:

$$M\Delta\ddot{X} + C^*\Delta\dot{X} + K^*\Delta X = \Delta P(t) \quad (5)$$

$$\Delta\ddot{X} = \ddot{X}_k - \ddot{X}_{k-1}$$

<sup>8</sup> Instantaneous

$$\Delta \dot{X} = \dot{X}_k - \dot{X}_{k-1}$$

$$\Delta X = X_k - X_{k-1}$$

$$\Delta P(t) = P_k - P_{k-1}$$

$$P_{k-1} = Mi \dot{X}_{gk-1} - Du_{k-1}$$

$$P_k = Mi \dot{X}_{gk} - Du_k$$

$C^*$  و  $K^*$  نیز به ترتیب ماتریس‌های میرایی و سختی مماسی هستند. بر اساس روش نیومارک، حل مجموعه‌ی روابط فوق پاسخ‌های سازه‌ای را مطابق روابط زیر نتیجه می‌دهد:

$$\dot{X}_k = (1 - a_2)\dot{X}_{k-1} - a_2\ddot{X}_{k-1} + a_1\Delta X_k \quad (6)$$

$$\dot{X}_k = (1 - a_5)\dot{X}_{k-1} - a_6\ddot{X}_{k-1} + a_4\Delta X_k$$

$$X_k = X_{k-1} + \Delta X$$

$$\Delta X_k = K_{nk}^{*-1} \Delta F_k$$

و نیز می‌توان چنین نوشت:

$$K_{nk}^* = a_1 M - a_4 C_{k-1}^* + K_{k-1}^* \quad (7)$$

$$\Delta F_k = (P_k - P_{k-1}) + M(a_2 \dot{X}_{k-1} + a_3 \ddot{X}_{k-1}) + C_{k-1}^*(a_5 \dot{X}_{k-1} + a_6 \ddot{X}_{k-1}) \quad (8)$$

که در این معادلات  $K_{nk}^*$  متغیر با زمان می‌باشد. در معادلات فوق ضرایب ثابت نیز به شرح زیر می‌باشند:

$$a_1 = \frac{1}{\delta \Delta t^2}, a_2 = \frac{1}{\delta \Delta t}, a_3 = \frac{1}{2\delta} \quad (9)$$

$$a_4 = \frac{\gamma}{\delta \Delta t}, a_5 = \frac{\gamma}{\delta}, a_6 = \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\delta} - 1 \right)$$

در رابطه‌ی اخیر  $\delta$  و  $\gamma$  پارامترهای روابط نیومارک می‌باشند.

در روش کنترل لحظه‌ای، شاخص عملکرد در هر گام شامل تاریخچه‌ای از پاسخ سیستم و نیروی کنترل می‌باشد. به منظور ارزیابی تاثیر پاسخ‌های تغییر مکان، سرعت و واکنش شتاب بر کارایی سیستم کنترل، استفاده‌ی کامل از تاریخچه پاسخ‌های سیستم و نیروی کنترل در شاخص عملکرد مد نظر قرار می‌گیرد.

$$J_k = \frac{1}{2} (\dot{X}_k^T Q_1 \dot{X}_k + X_k^T Q_2 X_k + \dot{X}_k^T Q_3 \dot{X}_k + u_k^T R u_k) \quad (10)$$

در رابطه ۱۰ ماتریس‌های  $Q_1$ ،  $Q_2$  و  $Q_3$  ماتریس‌های وزن مثبت نیمه‌ی معین متناظر با هزینه‌ی تغییر مکان‌ها، سرعت‌ها و شتاب‌های بزرگ می‌باشند.  $R$  نیز یک ماتریس وزن مثبت نیمه‌ی معین برای نشان دادن هزینه‌ی استفاده از نیروهای کنترلی بزرگ است.

در روش کنترل لحظه ای بهینه، در هر بازه ی زمانی، نیروی کنترل  $u_k$  با توجه به حداقل نمودن شاخص عملکرد  $J_k$  در آن بازه ی زمانی به دست می آید. با این منظور مجموعه ی معادلات ۶ الی ۸ به عنوان قیود در نظر گرفته شده و همیلتونین مسئله بهینه سازی به شرح زیر تشکیل گردیده است:

$$H_k = \frac{1}{2} (X_k^T Q_1 X_k + \dot{X}_k^T Q_2 \dot{X}_k + \ddot{X}_k^T Q_3 \ddot{X}_k + u_k^T R u_k) \quad (11)$$

$$+ \lambda_1^T (X_k - X_{k-1} - \Delta X)$$

$$+ \lambda_2^T (\dot{X}_k - (1 - a_5) \dot{X}_{k-1} + a_6 \ddot{X}_{k-1} - a_4 \Delta \dot{X}_k)$$

$$+ \lambda_3^T (\ddot{X}_k - (1 - a_3) \ddot{X}_{k-1} + a_2 \dot{X}_{k-1} - a_1 \Delta \ddot{X}_k)$$

در معادله اخیر  $\lambda_i^T$  ضریب های لاگرانژ هستند. شرط لازم برای به حداقل رساندن شاخص عملکرد  $J(t)$  عبارتست از:

$$\frac{\partial H_k}{\partial u_k^T} = \frac{\partial H_k}{\partial \dot{X}_k^T} = \frac{\partial H_k}{\partial \ddot{X}_k^T} = \frac{\partial H_k}{\partial X_k^T} = \frac{\partial H_k}{\partial \lambda_1^T} = \frac{\partial H_k}{\partial \lambda_2^T} = \frac{\partial H_k}{\partial \lambda_3^T} = 0 \quad (12)$$

جایگزینی رابطه ۱۱ در ۱۲ چنین نتیجه می دهد:

$$Q_1 X_k + \lambda_1 = 0 \quad (13)$$

$$Q_2 \dot{X}_k + \lambda_2 = 0$$

$$Q_3 \ddot{X}_k + \lambda_3 = 0$$

$$R u_k + D^T K_{nk}^{*-T} (\lambda_1 + a_4 \lambda_2 + a_1 \lambda_3) = 0 \quad (14)$$

$$X_k - X_{k-1} - \Delta X = 0 \quad (15)$$

$$\dot{X}_k - (1 - a_5) \dot{X}_{k-1} - a_6 \ddot{X}_{k-1} - a_4 \Delta \dot{X}_k = 0$$

$$\ddot{X}_k - (1 - a_3) \ddot{X}_{k-1} - a_2 \dot{X}_{k-1} - a_1 \Delta \ddot{X}_k = 0$$

با جایگزینی روابط ۱۳ در رابطه ۱۴ و پس از انجام عملیات جبری و ساده سازی نیروی کنترل مطابق رابطه ی زیر تعیین می گردد:

$$u_k = -R^{-1} D^T K_{nk}^{*-T} (Q_1 X_k + a_4 Q_2 \dot{X}_k + a_1 Q_3 \ddot{X}_k) \quad (16)$$

در روابط اخیر منظور از  $T$ -ترانهاده ی معکوس ماتریس می باشد. مطابق رابطه ی ۱۶ مشهود است که نیروی کنترل کاملا تابعی از تاریخچه پاسخ ها و ماتریس های وزن دهی می باشد.

## ۲- صحت سنجی برنامه ی کامپیوتری

در این پژوهش یک برنامه ی کامپیوتری براساس روش های موجود تحلیل در حوزه ی زمان، برای بررسی عملکرد کنترل فعال در کاهش پاسخ سازه ها تهیه شده است. کد کامپیوتری مورد بحث با استفاده از الگوریتم کنترل فعال بهینه ی لحظه ای به روش نیومارک-بتا در محیط [10] MATLAB پیاده سازی گردیده است و قادر است پاسخ های سازه  $n$  درجه آزادی را محاسبه نماید. در شروع روند تحلیل، برنامه وارد اصلی ترین جزء آن یعنی تابعی که وظیفه تکرار را برعهده دارد، می شود. در این بخش در ابتدا مقداری اولیه برای پاسخ سازه

فرض می‌شود. سپس با استفاده از این مقدار و کمینه‌سازی شاخص عملکرد، اولین نیروی کنترلی محاسبه می‌گردد (رابطه ۱۶). در روندی معکوس و با استفاده از نیروی کنترل موجود، مقداری برای پاسخ سازه به دست می‌آید (روابط ۶ الی ۸). مقدار محاسباتی پاسخ سازه با مقداری که در گام اول به عنوان پاسخ سازه انتخاب شده است، مقایسه می‌شود و اگر اختلاف آن‌ها از مقدار خطای مشخصی کوچکتر باشد پاسخ محاسبه شده به عنوان پاسخ سازه در بازه‌ی زمانی فعلی منظور شده و محاسبات در گام بعدی ادامه می‌یابد. پس از محاسبه‌ی مقادیر مورد قبول پاسخ‌های سازه‌ای، برنامه از حلقه تکرار خارج شده و با توجه به روابط ۲ و ۳ و مقادیر نیروهای کنترلی گام قبلی، مقادیر زوایا و نیروهای کنترلی ناشی از میراگر AVDS قابل محاسبه هستند.

اما لازمه‌ی اتکا به نتایج حاصل از چنین برنامه‌ی کامپیوتری، اطمینان از صحت نتایج خروجی می‌باشد. برای این بررسی از سازه ۷ طبقه‌ای که در تحقیقات ریباکوف و همکاران [۸] مورد بررسی قرار گرفته، استفاده می‌شود. این سازه به صورت مدلی با جرم متمرکز<sup>۹</sup> ایده‌آل‌سازی شده است. بنابراین در هر طبقه‌ی آن یک جرم با یک درجه آزادی جانبی قرار می‌گیرد که آن را تبدیل به سازه‌ای ۷ درجه آزادی می‌نماید. در روند تحلیل و برای محاسبه ضریب میرایی این سازه نسبت میرایی آن برای اولین مود نوسانی برابر  $0.2$  در نظر گرفته شده است. در مطالعه انجام شده توسط ریباکوف و همکاران [۸] ضریب  $\alpha$  برابر ۱ در نظر گرفته شده است. همچنین در همین مرجع ضریب  $C_{VD}$  برای میراگر برابر  $10^6 \times 1.07$  N-s/m در نظر گرفته شده است. به منظور مقایسه نتایج در این جا نیز همین ضرایب برای میراگر AVDS استفاده گردیدند.

ضرایب وزن‌دهی نیروی کنترل و پاسخ‌های سازه، دیگر پارامترهای تاثیر گذار در روند کنترل فعال سازه می‌باشند. این ضرایب اولویت صرف انرژی و به تبع آن صرف هزینه را برای نیروی کنترل و پاسخ سازه مشخص می‌نمایند. در این جا ضرایب Q و R به شکل زیر تعریف شده اند:

$$R = 10^{-4}, Q = 400 \quad (17)$$

نتایج کد مورد نظر در سه تحلیل متفاوت مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. این تحلیل‌ها عبارتند از: پاسخ سیستم یک درجه آزادی تحت یک پالس سینوسی، پاسخ یک سازه ۷ درجه آزادی تحت رکورد زلزله، پاسخ کنترل شده سازه ۷ درجه آزادی برای هر یک از این سه حالت، پاسخ‌های مورد نظر در مراجع انتخابی موجود بوده که می‌توان از آنها برای صحت‌سنجی نتایج کد مورد نظر، استفاده نمود.

## ۱-۲- صحت‌سنجی کد برای پاسخ سیستم یک درجه آزادی تحت اثر پالس سینوسی

در این بخش پاسخ‌های سیستمی یک درجه آزادی مورد بررسی قرار می‌گیرند. پاسخ‌های دقیق این مدل در فصل پنجم از کتاب دینامیک سازه‌های آنیل چوپرا<sup>۱۰</sup> قابل مشاهده می‌باشند [۱۱]. در این مرجع این مدل به روش عددی نیومارک تحلیل گردیده است. مشخصات دینامیکی این مدل در جدول ۱ آورده شده اند. این مدل تحت اثر یک پالس سینوسی مطابق شکل ۲ قرار گرفته است.

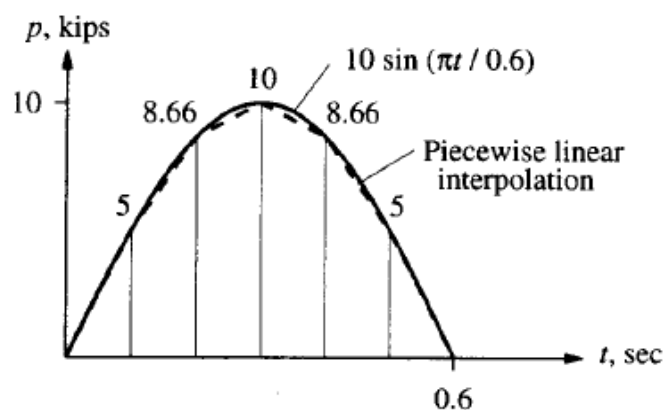
جدول ۱: مشخصات سیستم یک درجه آزادی

نسبت میرایی ( $\xi$ )	فرکانس طبیعی ( $\omega$ : rad/sec)	سختی (K: kips/in)	جرم ( $m$ : kips - sec <sup>2</sup> /in)
۰/۰۵	۶/۲۸۳	۱۰	۰/۲۵۳۳

<sup>۹</sup> Lumped Mass

<sup>۱۰</sup> Anil.K.Chopra





شکل ۲- نمایش پالس سینوسی محرک [۱۱]

همان‌طور که در شکل اخیر مشاهده می‌گردد به منظور استفاده از این تحریک در تحلیل عددی، نمودار آن به صورت خطی تقریب زده شده است و مقادیر نیرو در بازه‌های زمانی ۰/۱ ثانیه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که هم در مرجع مورد اشاره و هم در کد کامپیوتری نتایج این سیستم با استفاده از روش عددی نیومارک- شتاب ثابت متوسط تعیین گردیده‌اند. جداول ۲ تا ۴ پاسخ‌های جابجایی، سرعت و شتاب برنامه کامپیوتری را با پاسخ‌های دقیق آن مقایسه می‌نمایند. با توجه به نتایج مندرج در این جداول پاسخ‌های حاصل از برنامه کامپیوتری با دقت بسیار بالایی با پاسخ‌های موجود در مرجع برابر می‌باشند.

جدول ۲: پاسخ جابجایی سیستم یک درجه آزادی

زمان (sec)	نیرو (kips)	جابجایی (in)	
		حل عددی مطابق مرجع [۱۱]	کد کامپیوتری
۰	۰	۰	۰
۰/۱	۵	۰/۰۴۳۷	۰/۰۴۳۷
۰/۲	۸/۶۶	۰/۲۳۲۶	۰/۲۳۲۶
۰/۳	۱۰/۰	۰/۶۱۲۱	۰/۶۱۲۱
۰/۴	۸/۶۶	۱/۰۸۲۵	۱/۰۸۲۵
۰/۵	۵	۱/۴۳۰۹	۱/۴۳۰۹
۰/۶	۰	۱/۴۲۳۱	۱/۴۲۳۱
۰/۷	۰	۰/۹۶۲۲	۰/۹۶۲۲
۰/۸	۰	۰/۱۹۰۸	۰/۱۹۰۸
۱/۰	۰	-۰/۱۴۴۲	-۰/۱۴۴۲

جدول ۳: پاسخ سرعت سیستم یک درجه آزادی

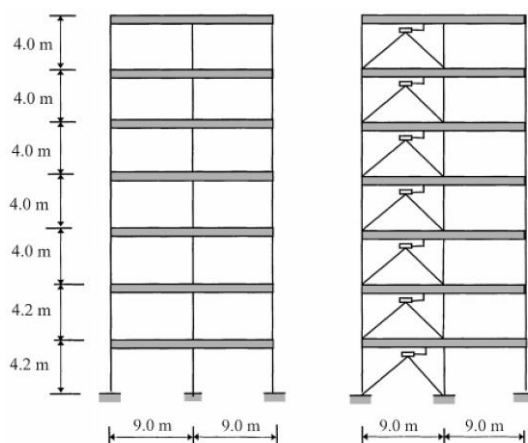
زمان (sec)	نیرو (kips)	سرعت (in/sec)	
		حل عددی مطابق مرجع [۱۱]	کد کامپیوتری
۰	۰	۰	۰
۰/۱	۵	۰/۸۷۳۳	۰/۸۷۳۳
۰/۲	۸/۶۶	۲/۹۰۵۷	۲/۹۰۵۷
۰/۳	۱۰/۰	۴/۶۸۳۳	۴/۶۸۳۳
۰/۴	۸/۶۶	۴/۷۲۶۱	۴/۷۲۶۱
۰/۵	۵	۲/۲۴۲۲	۲/۲۴۲۲
۰/۶	۰	-۲/۳۹۹۵	-۲/۳۹۹۶
۰/۷	۰	-۶/۸۱۸۳	-۶/۸۱۸۴
۰/۸	۰	-۸/۶۰۹۵	-۸/۶۰۹۶
۱/۰	۰	-۳/۵۰۲۹	-۳/۵۰۲۸

جدول ۴-۴: پاسخ شتاب سیستم یک درجه آزادی

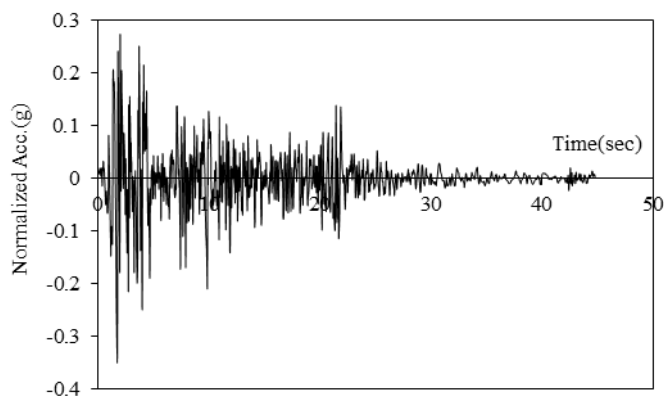
زمان (sec)	نیرو (kips)	شتاب (in/sec <sup>2</sup> )	
		حل عددی مطابق مرجع [۱۱]	کد کامپیوتری
۰	۰	۰	۰
۰/۱	۵	۱۷/۴۶۶۶	۱۷/۴۶۶۸
۰/۲	۸/۶۶	۲۳/۱۸۰۳	۲۳/۱۸۰۳۲
۰/۳	۱۰/۰	۱۲/۳۷۲۴	۱۲/۳۷۲۴۹
۰/۴	۸/۶۶	-۱۱/۵۱۶۹	-۱۱/۵۱۷۱
۰/۵	۵	-۳۸/۱۶۱۱	-۳۸/۱۶۱۸
۰/۶	۰	-۵۴/۶۷۳۳	-۵۴/۶۷۴
۰/۷	۰	-۳۳/۷۰۱۷	-۳۳/۷۰۱۸
۰/۸	۰	-۲/۱۲۲۹	-۲/۱۲۲۶
۱/۰	۰	۴۷/۳۷۱۴	۴۷/۳۷۲۶۶

## ۲-۲- صحت‌سنجی کد برای پاسخ کنترل نشده‌ی سازه‌ی ۷ درجه آزادی تحت رکورد زلزله

سازه مورد بررسی در شکل ۳ و شتاب‌نگاشت مورد استفاده در صحت‌سنجی این مدل مربوط به زلزله El-Centro S00E, 1940 می‌باشد که در شکل ۴ نمایش داده شده است. در جدول ۵ نیز جابجایی طبقات مختلف مدل را که توسط کد کامپیوتری محاسبه شده در مقابل جابجایی موجود در مطالعات ریباکوف و همکاران [۸] نمایش داده شده است.



شکل ۳- قاب خمشی دوبعدی دارای تیرهای صلب [۳]



شکل ۴- نمایش شتاب‌نگاشت زلزله El-Centro 1940

جدول ۵: پاسخ جابجایی در تراز طبقات سیستم ۷ درجه آزادی (بدون اعمال کنترل)

طبقه	جابجایی (cm)	
	حل مطابق مرجع [۸]	کد کامپیوتری
۷	۱۴/۲۱	۱۳/۲۹
۶	۱۳/۲۴	۱۲/۴۹
۵	۱۱/۷۶	۱۰/۹۳
۴	۱۰/۰۱	۹/۱۴
۳	۷/۶۹	۶/۹۶
۲	۵/۵۴	۴/۹۲
۱	۲/۸۷	۲/۵۳

جدول ۶ نیز برش پایه مدل مورد بررسی را که توسط کد کامپیوتری محاسبه شده در مقابل برش پایه موجود در مطالعات ریباکوف و همکاران [۸] نمایش می‌دهد. نتایج حاصل نشان از دقت مناسب برنامه کامپیوتری در تخمین پاسخها دارد.

جدول ۶: برش پایه سیستم ۷ درجه آزادی (بدون اعمال کنترل)

برش پایه (KN)	
حل مطابق مرجع [۸]	کد کامپیوتری
۱۸۱۳/۳	۱۹۰۰/۷

### ۲-۳- صحت‌سنجی پاسخ کنترل شده‌ی سازه‌ی ۷ درجه آزادی تحت اثر رکورد زلزله

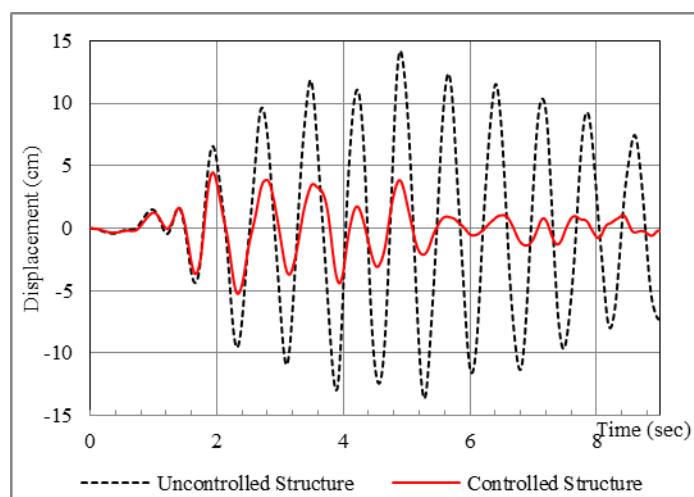
در ادامه پاسخ کنترل شده‌ی مدل اخیر با میراگر فعال AVDS محاسبه شده توسط برنامه کامپیوتری با نتایج موجود در مرجع [۸] مقایسه می‌گردد. این نتایج در جدول ۷ و ۸ نمایش داده شده‌اند. در اشکال ۵ تا ۷ به ترتیب جابجایی، سرعت و شتاب سازه در تراز سقف نمایش داده شده‌اند. در این اشکال پاسخ سازه در دو حالت بدون کنترل و کنترل شده ارائه شده است. لازم به ذکر است که پاسخها تنها در ۱۰ ثانیه اول حرکت نمایش داده شده است. این بازه زمانی از آن جهت انتخاب شده است که ماکزیمم پاسخ سازه در این بازه زمانی قرار می‌گیرد. ملاحظه می‌شود که اثر کنترل فعال با میراگر AVDS توانسته است تا حد زیادی منجر به تقلیل در اندازه پاسخها گردد. اگر این نمودارها با نمودارهای موجود در مطالعات ریباکوف و همکاران مقایسه شوند، کاهش پاسخ مشهود است (اشکال ۸ و ۹). واضح است که اعمال کنترل فعال توانسته است تا حد زیادی پاسخها را کاهش دهد. میزان کاهش پاسخها در نتایج حاصل از برنامه کامپیوتری در محدوده‌ی ۱۰ ثانیه اول، بیش از ۵۰ درصد می‌باشد. در نمودارهای مرجع نیز می‌توان همین مقدار کاهش پاسخ را مشاهده نمود که در مجموع می‌تواند مؤید صحت نتایج کد کامپیوتری باشد.

جدول ۷: پاسخ جابجایی در تراز طبقات سیستم ۷ درجه آزادی (با اعمال کنترل)

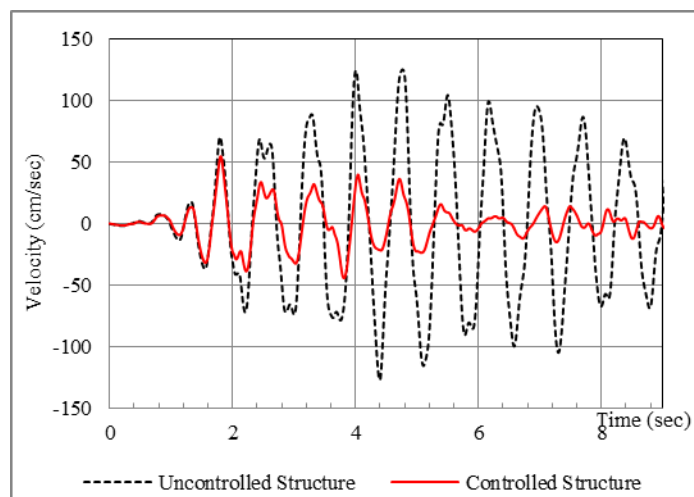
طبقه	جابجایی (cm)	
	حل مطابق مرجع [۸]	کد کامپیوتری
۷	۴/۹۳	۵/۲۳
۶	۴/۶۴	۴/۹۱
۵	۴/۰۸	۴/۲۳
۴	۳/۴۱	۳/۴۰
۳	۲/۵۹	۲/۵۱
۲	۱/۸۴	۱/۸۵
۱	۰/۹۱	۰/۹۸

جدول ۸: برش پایه سیستم ۷ درجه آزادی (با اعمال کنترل)

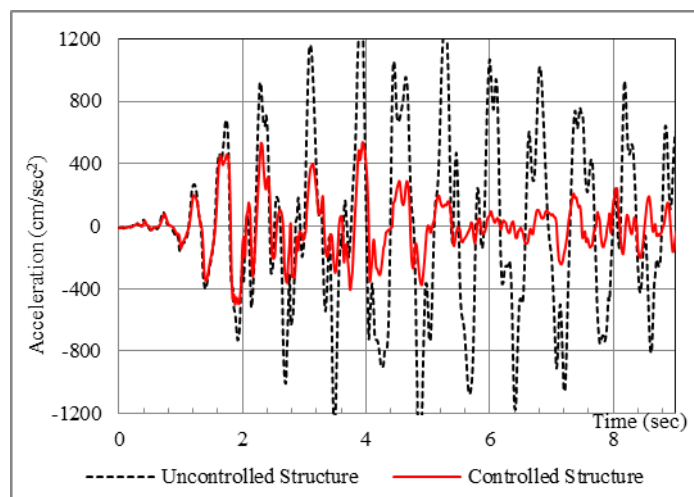
برش پایه (KN)	
حل مطابق مرجع [۸]	کد کامپیوتری
۱۳۵۹	۱۲۹۳



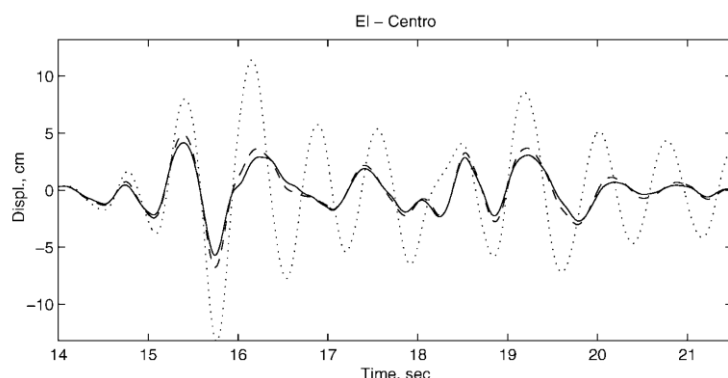
شکل ۵- نمایش جابجایی در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله El-Centro 1940



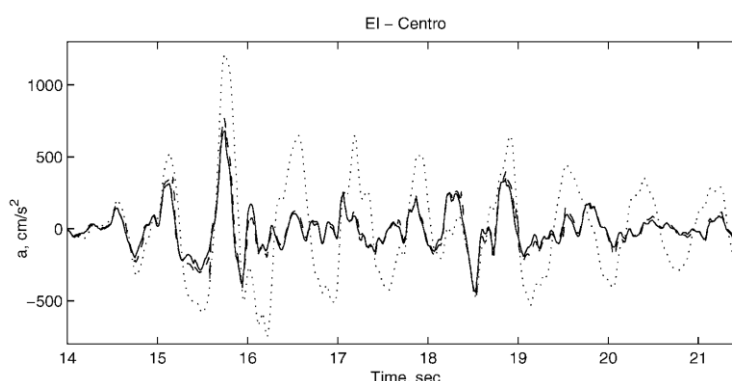
شکل ۶- نمایش سرعت در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله El-Centro 1940



شکل ۷- نمایش شتاب در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله El-Centro 1940



شکل ۸- نمایش جابجایی در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله El-Centro 1940 [۸]



شکل ۹- نمایش شتاب در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله El-Centro 1940 [۸]

### ۳- اثر میراگر ویسکوز فعال در کاهش پاسخ سازه در زلزله حوزه دور و نزدیک

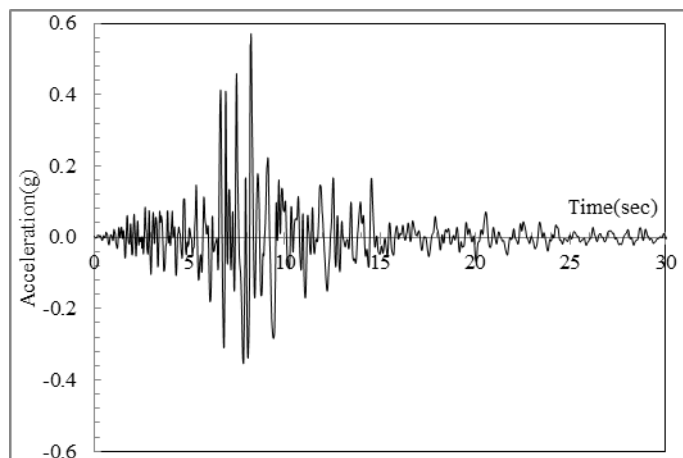
در این بخش به بررسی خروجی های حاصل از کد کامپیوتری که در بخش‌های قبلی صحت نتایج آن به تایید رسید، پرداخته می‌شود. شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده طوری انتخاب گردیده‌اند که شامل زلزله‌های حوزه نزدیک و دور باشند [۱۲]. مدل سازه‌ای انتخاب شده در این بررسی همان قاب خمشی دو بعدی ۷ طبقه است که در تحقیقات ریباکوف و همکاران [۸] مورد بررسی قرار گرفته بود.

#### ۳-۱- نتایج حاصل از رکوردهای زلزله حوزه دور

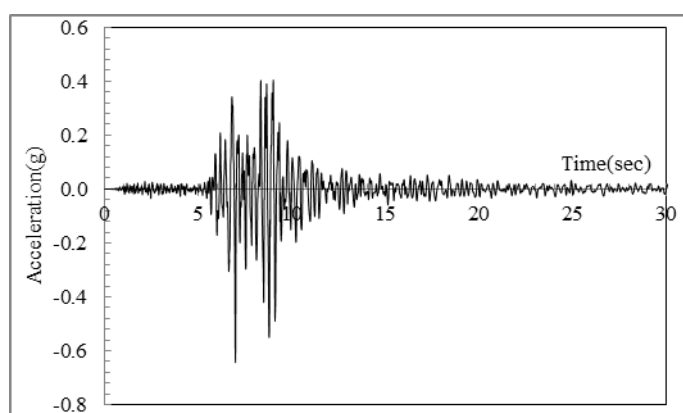
در بخش اول نتایج حاصل از تحلیل مدل سازه‌ای تحت دو شتاب نگاشت زلزله حوزه‌ی دور ارائه شده‌اند. این شتاب نگاشتها در فواصل بیش از ۱۲ کیلومتر ثبت شده‌اند. مشخصات مربوط به شتاب نگاشت های حوزه دور در جدول ۹ ارائه گردیده‌اند. همچنین شتاب نگاشت های مورد استفاده در تحلیل سازه در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده‌اند.

جدول ۹: مشخصات شتاب نگاشتهای حوزه دور

نام	سال وقوع	ایستگاه ثبت	بزرگا	$PGA(g)$	فاصله سطحی مرکز از ایستگاه (Km)	عمق وقوع (Km)
Northridge	۱۹۹۴	Old Ridge Route	۶/۶۹	۰/۴۸۹۸	۴۰/۶۸	۱۷/۵۱
Whittier Narrows	۱۹۸۷	Cedar Hill	۵/۹۹	۰/۵۹۵۹	۴۵/۹۰	۱۴/۵۸



شکل ۱۰- نمایش شتاب نگاشت زلزله Northridge 1994



شکل ۱۱- نمایش شتاب نگاشت زلزله Whittier Narrows 1987

با اعمال این شتاب نگاشتها به مدل پیشینه پاسخ جابجایی، سرعت و شتاب استخراج شده است. این پاسخ ها در دو حالت کنترل شده و بدون کنترل و در جداول ۱۰ و ۱۱ و اشکال ۱۲ ال ۱۷ ارائه شده اند.

جدول ۱۰: پیشینه پاسخهای جابجایی، سرعت و شتاب در طبقات مدل ۷ درجه آزادی تحت شتاب نگاشت Northridge 1994

طبقه	پاسخ جابجایی (cm)			پاسخ سرعت (cm/sec)			پاسخ شتاب (cm/sec <sup>2</sup> )		
	کنترل شده	کنترل نشده	تغییرات	کنترل شده	کنترل نشده	تغییرات	کنترل شده	کنترل نشده	تغییرات
۱	۱/۹	۵/۴	-/۰.۶۵	۲۵/۹	۵۸/۰	-/۰.۵۵	۴۵۲/۲	۹۹۵/۳	-/۰.۵۴
۲	۳/۷	۱۰/۲	-/۰.۶۴	۵۰/۰	۱۰۲/۷	-/۰.۵۱	۷۲۷/۹	۱۵۲۷/۹	-/۰.۵۲
۳	۵/۱	۱۳/۷	-/۰.۶۳	۶۳/۶	۱۲۶/۹	-/۰.۵۰	۸۵۶/۳	۱۹۲۶/۷	-/۰.۵۵
۴	۶/۵	۱۶/۷	-/۰.۶۱	۶۹/۵	۱۳۹/۹	-/۰.۵۰	۷۹۸/۵	۱۹۸۸/۲	-/۰.۶۰
۵	۷/۹	۱۸/۶	-/۰.۵۷	۶۷/۹	۱۴۹/۹	-/۰.۵۴	۷۸۲/۹	۱۶۰۰/۶	-/۰.۵۱
۶	۹/۵	۱۹/۶	-/۰.۵۱	۷۶/۸	۱۹۷/۱	-/۰.۶۱	۱۰۶۶/۰	۱۹۴۵/۸	-/۰.۴۵
۷	۱۰/۶	۲۰/۸	-/۰.۴۹	۸۳/۴	۲۲۰/۲	-/۰.۶۲	۱۴۵۰/۱	۲۵۸۴/۱	-/۰.۴۴

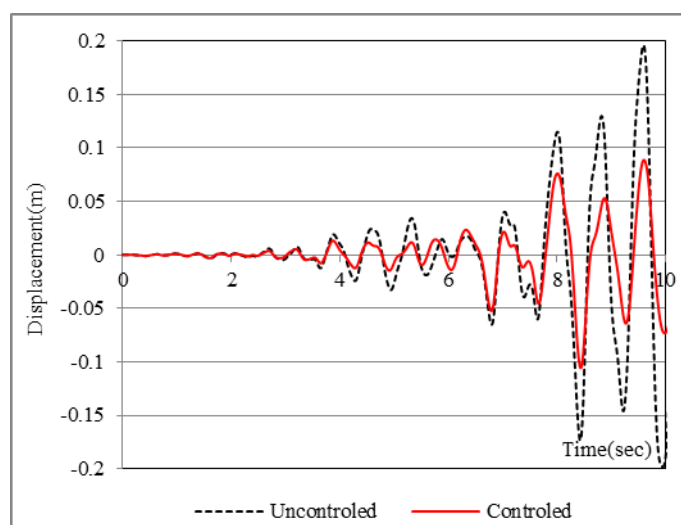
بر اساس جدول ۱۰، متوسط پاسخ کنترل شده‌ی جابجایی، سرعت و شتاب سیستم در زلزله Northridge به ترتیب ۵۸، ۵۴ و ۵۱ درصد نسبت به حالت کنترل نشده کاهش یافته است. کاهش پاسخ جابجایی در طبقات پایین بیشتر است ولی تغییرات پاسخ سرعت و شتاب دارای روند مشخصی نیست.

بر اساس جدول ۱۱، متوسط پاسخ کنترل شده‌ی جابجایی، سرعت و شتاب سیستم در زلزله Whittier Narrows به ترتیب ۶۰، ۵۱ و ۷۰ درصد نسبت به حالت کنترل نشده کاهش یافته است. کاهش پاسخ جابجایی در طبقات بالا بیشتر است ولی تغییرات پاسخ

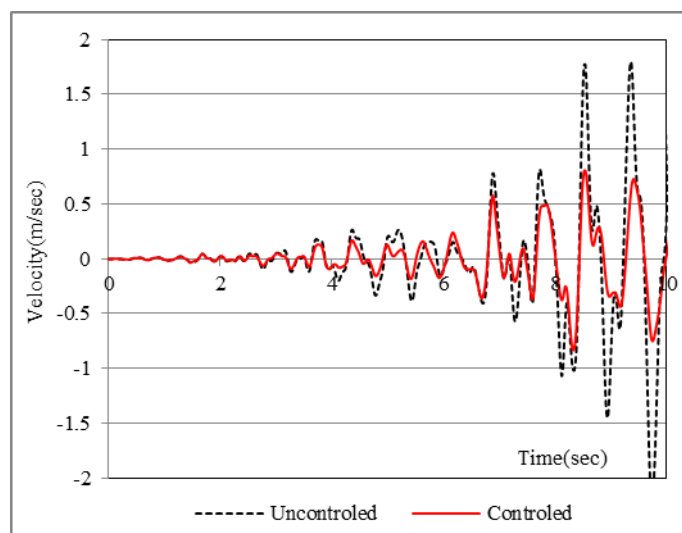
سرعت و شتاب در این جا نیز دارای روند مشخصی نیست. هم چنین مطابق نمودارهای حاصله، با افزایش پاسخ جابجایی، سرعت و شتاب سازه، میزان تاثیر سیستم کنترلی در کاهش پاسخ نیز بیشتر می‌گردد.

جدول ۱: بیشینه پاسخهای جابجایی، سرعت و شتاب در طبقات مدل ۷ درجه آزادی تحت شتاب نگاشت Whittier Narrows 1987

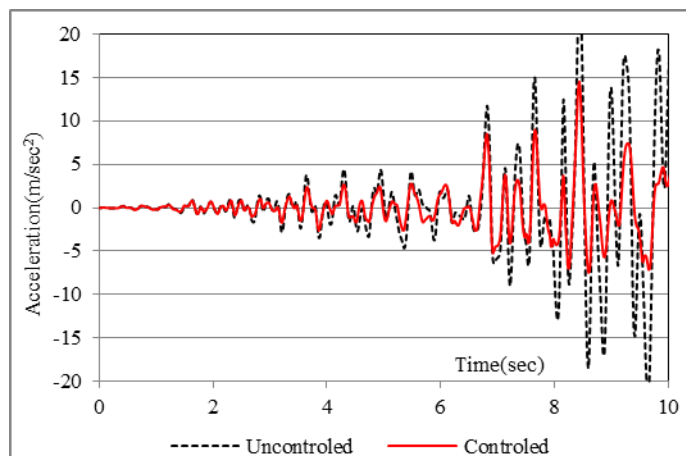
طبقه	پاسخ جابجایی (cm)			پاسخ سرعت (cm/sec)			پاسخ شتاب ( $\text{cm/sec}^2$ )		
	کنترل شده	کنترل نشده	تغییرات	کنترل شده	کنترل نشده	تغییرات	کنترل شده	کنترل نشده	تغییرات
۱	۰/۶	۱/۸	-۰/۶۷	۱۲/۰	۳۳/۶	-۰/۶۴	۴۴۶/۱	۹۷۹/۹	-۰/۵۴
۲	۱/۰	۳/۲	-۰/۶۹	۱۸/۹	۴۵/۸	-۰/۵۹	۴۶۵/۳	۱۰۶۵/۱	-۰/۵۶
۳	۱/۲	۴/۰	-۰/۷۰	۲۲/۸	۵۹/۷	-۰/۶۲	۵۰۴/۶	۱۰۶۴/۹	-۰/۵۳
۴	۱/۴	۴/۷	-۰/۷۰	۲۶/۲	۶۶/۰	-۰/۶۱	۵۱۱/۳	۱۲۲۹/۳	-۰/۵۸
۵	۱/۶	۵/۱	-۰/۶۹	۲۷/۱	۵۶/۸	-۰/۵۳	۵۹۸/۹	۱۰۰۲/۸	-۰/۴۰
۶	۱/۹	۶/۵	-۰/۷۱	۳۰/۰	۷۳/۸	-۰/۶۰	۶۹۲/۴	۱۲۰۵/۷	-۰/۴۲
۷	۲/۱	۷/۳	-۰/۷۱	۳۴/۵	۹۱/۲	-۰/۶۲	۷۴۰/۷	۱۷۴۱/۷	-۰/۵۷



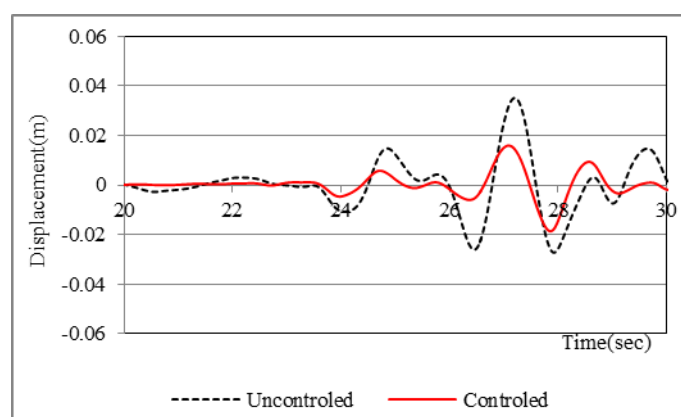
شکل ۱۲- نمایش جابجایی در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله Northridge 1994



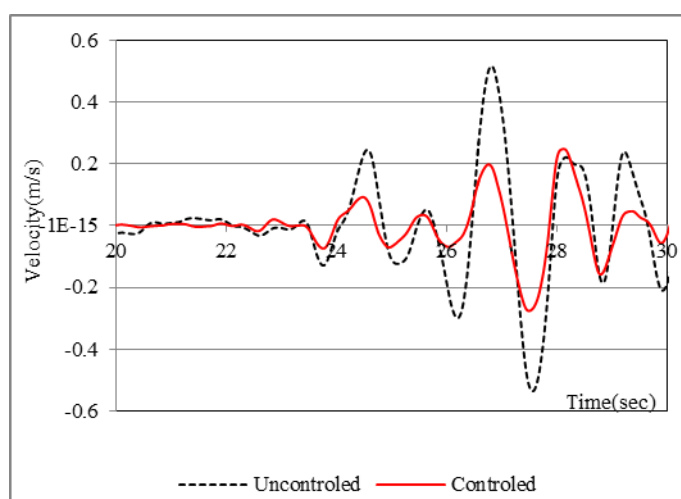
شکل ۱۳- نمایش سرعت در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله Northridge 1994



شکل ۱۴- نمایش شتاب در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله Northridge 1994

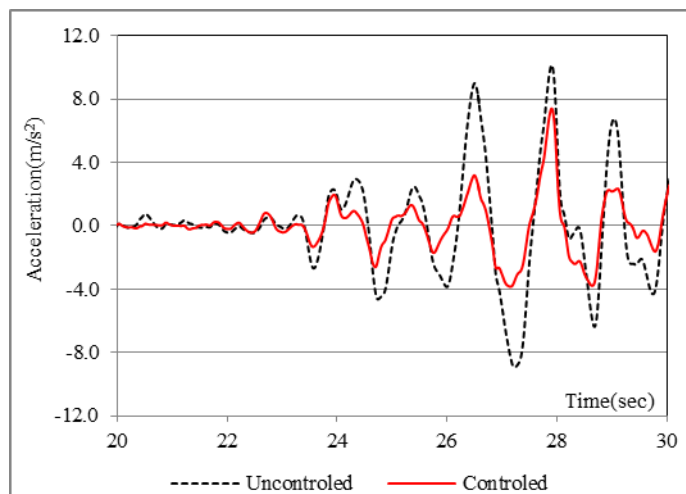


شکل ۱۵- نمایش جابجایی در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله Whittier Narrows 1987



شکل ۱۶- نمایش سرعت در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله Whittier Narrows 1987





شکل ۱۷- نمایش شتاب در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله Whittier Narrows 1987

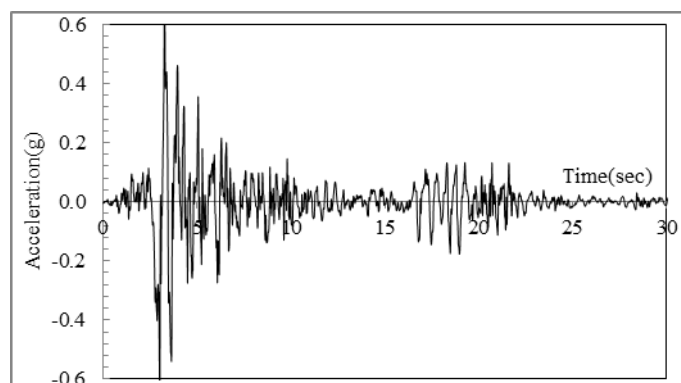
### ۳-۲- نتایج حاصل از رکوردهای زلزله حوزه نزدیک

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل مدل سازه ای تحت دو شتاب نگاشت زلزله حوزه نزدیک آورده شده اند. مشخصات مربوط به شتاب نگاشتهای حوزه دور در جدول ۱۲ و اشکال ۱۸ و ۱۹ گزارش گردیده اند.

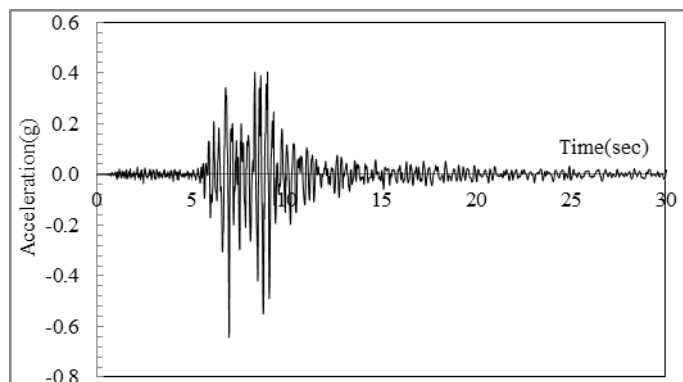
با اعمال این شتاب نگاشت ها به مدل خروجی ها به صورت بیشینه پاسخ های جابجایی، سرعت و شتاب در نظر گرفته شده است. این پاسخها در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده در جداول ۱۳ و ۱۴ و اشکال ۲۰ الی ۲۵ آورده شده اند.

جدول ۱۲: مشخصات شتاب نگاشتهای حوزه نزدیک

نام	سال وقوع	ایستگاه ثبت	بزرگا	$PGA(g)$	فاصله سطحی مرکز از ایستگاه (Km)	عمق وقوع (Km)
Cape Mendocino	۱۹۹۲	Petrolia	۷/۰۱	۰/۶۲۳	۴/۵۱	۹/۵۰
N. Palm Springs	۱۹۸۶	Whitewater Trout Farm	۶/۰۶	۰/۶۰۲	۴/۲۴	۱۲/۵۳



شکل ۱۸- نمایش شتاب نگاشت زلزله Cape Mendocino 1992



شکل ۱۹- نمایش شتاب نگاشت زلزله N.Palm springs 1986

جدول ۱۳: بیشینه پاسخهای جابجایی، سرعت و شتاب در طبقات مدل ۷ درجه آزادی تحت شتاب نگاشت Cape Mendocino 1992

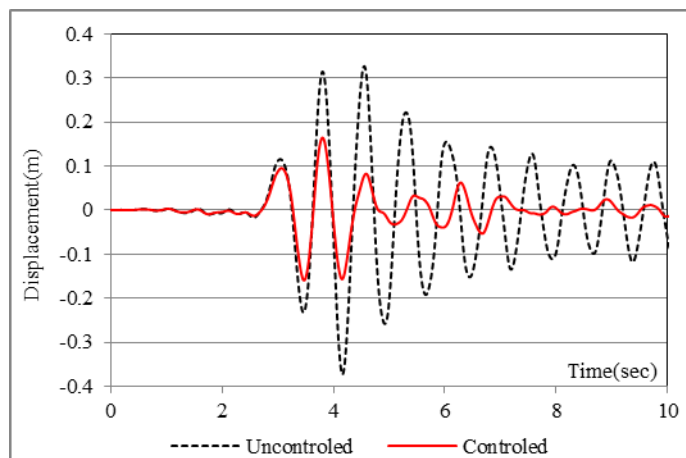
طبقه	پاسخ جابجایی (cm)			پاسخ سرعت (cm/sec)			پاسخ شتاب (cm/sec <sup>2</sup> )		
	کنترل شده	کنترل نشده	تغییرات	کنترل شده	کنترل نشده	تغییرات	کنترل شده	کنترل نشده	تغییرات
۱	۳/۳	۷/۰	-۵۳٪	۳۳/۹	۷۲/۳	-۵۳٪	۴۶۸/۷	۹۹۱/۷	-۵۳٪
۲	۶/۳	۱۳/۸	-۵۴٪	۶۲/۴	۱۳۰/۷	-۵۲٪	۸۱۲/۰	۱۴۷۵/۱	-۴۵٪
۳	۸/۷	۱۹/۳	-۵۵٪	۸۶/۷	۱۸۰/۲	-۵۲٪	۱۰۱۹/۸	۱۶۸۵/۹	-۳۹٪
۴	۱۱/۲	۲۵/۲	-۵۵٪	۱۰۸/۹	۲۲۷/۷	-۵۳٪	۱۰۴۲/۷	۱۹۶۲/۹	-۴۷٪
۵	۱۳/۵	۳۰/۱	-۵۵٪	۱۲۸/۲	۲۵۸/۱	-۵۰٪	۱۳۵۲/۴	۲۳۶۰/۶	-۴۳٪
۶	۱۵/۴	۳۴/۷	-۵۶٪	۱۵۰/۶	۲۸۰/۲	-۴۶٪	۱۵۱۹/۸	۲۷۱۱/۹	-۴۴٪
۷	۱۶/۴	۳۷/۳	-۵۶٪	۱۶۳/۴	۲۹۱/۷	-۴۴٪	۱۴۹۴/۵	۳۴۰۵/۴	-۵۶٪

بر اساس جدول ۱۲، متوسط پاسخ کنترل شده‌ی جابجایی، سرعت و شتاب سیستم در زلزله Cape Mendocino به ترتیب ۵۵، ۵۰ و ۴۵ درصد نسبت به حالت کنترل نشده کاهش یافته است. کاهش پاسخ جابجایی در طبقات تقریباً ثابت است ولی تغییرات پاسخ سرعت و شتاب دارای روند مشخصی نیست.

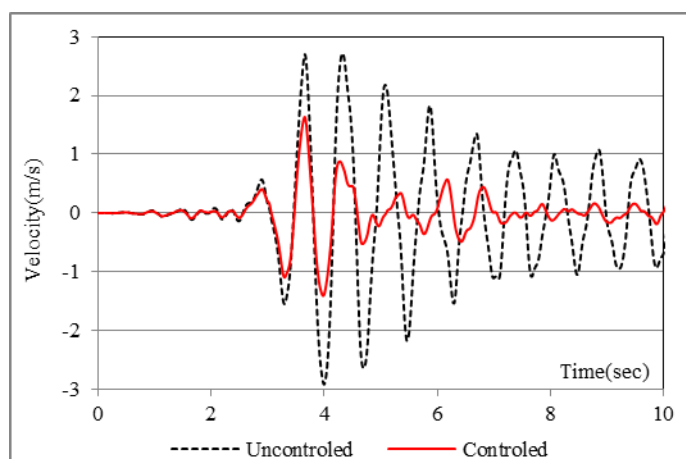
جدول ۱۴: بیشینه پاسخهای جابجایی، سرعت و شتاب در طبقات مدل ۷ درجه آزادی تحت شتاب نگاشت N.Palm springs 1986

طبقه	پاسخ جابجایی (cm)			پاسخ سرعت (cm/sec)			پاسخ شتاب (cm/sec <sup>2</sup> )		
	کنترل شده	کنترل نشده	تغییرات	کنترل شده	کنترل نشده	تغییرات	کنترل شده	کنترل نشده	تغییرات
۱	۰/۷	۱/۸	-۶۱٪	۹/۶	۴۰/۷	-۷۶٪	۳۵۶/۱	۱۱۷۳/۳	-۶۹٪
۲	۱/۳	۳/۳	-۶۱٪	۱۶/۳	۶۲/۰	-۷۴٪	۵۳۱/۹	۱۵۰۸/۱	-۶۵٪
۳	۱/۸	۴/۴	-۵۹٪	۲۰/۹	۶۳/۷	-۶۷٪	۵۷۶/۴	۱۴۲۹/۱	-۵۷٪
۴	۲/۳	۴/۵	-۴۹٪	۲۶/۱	۴۹/۵	-۴۷٪	۶۳۱/۱	۱۵۵۲/۵	-۵۹٪
۵	۲/۶	۶/۲	-۵۸٪	۲۹/۵	۶۳/۴	-۵۳٪	۵۹۱/۹	۱۱۰۹/۴	-۴۷٪
۶	۲/۹	۶/۶	-۵۶٪	۳۲/۷	۸۱/۶	-۶۰٪	۶۸۰/۸	۱۲۸۰/۵	-۴۷٪
۷	۳/۱	۷/۱	-۵۶٪	۳۴/۴	۸۴/۳	-۵۹٪	۷۳۷/۳	۱۷۷۲/۱	-۵۸٪

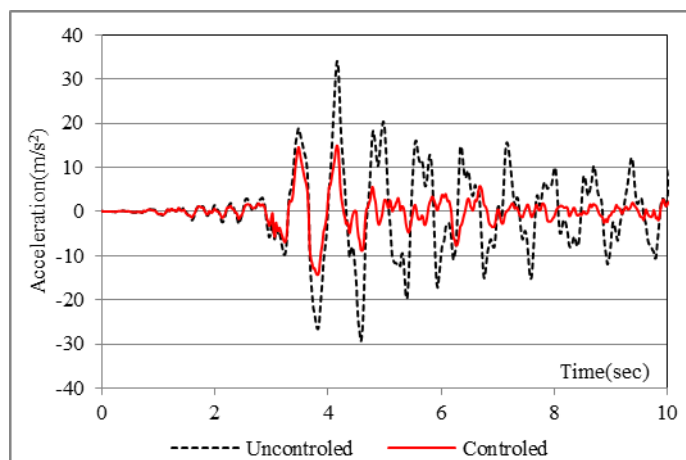
بر اساس جدول ۱۳، متوسط پاسخ کنترل شده‌ی جابجایی، سرعت و شتاب سیستم در زلزله N.Palm springs به ترتیب ۵۷، ۶۲ و ۵۷ درصد نسبت به حالت کنترل نشده کاهش یافته است. تغییرات پاسخ جابجایی، سرعت و شتاب در طبقات دارای روند مشخصی نیست. هم چنین مطابق نمودارهای حاصله، با افزایش زمان، میزان تاثیر سیستم کنترلی در کاهش پاسخ نیز بیشتر می‌گردد.



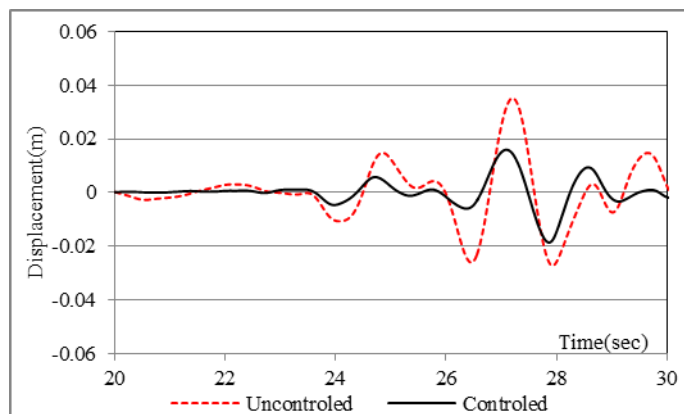
شکل ۲۰- نمایش جابجایی در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله Cape Mendocino 1992



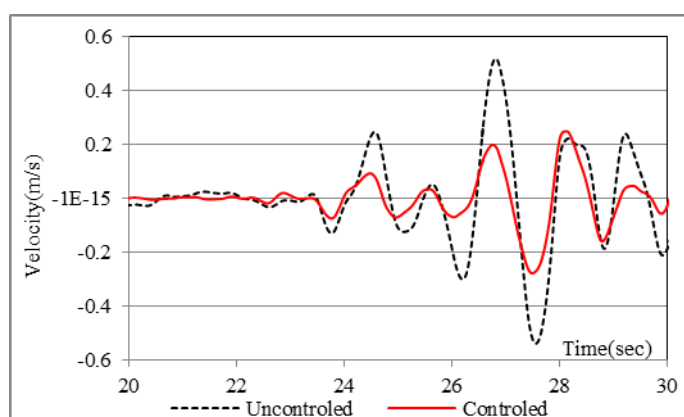
شکل ۲۱- نمایش سرعت در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله Cape Mendocino 1992



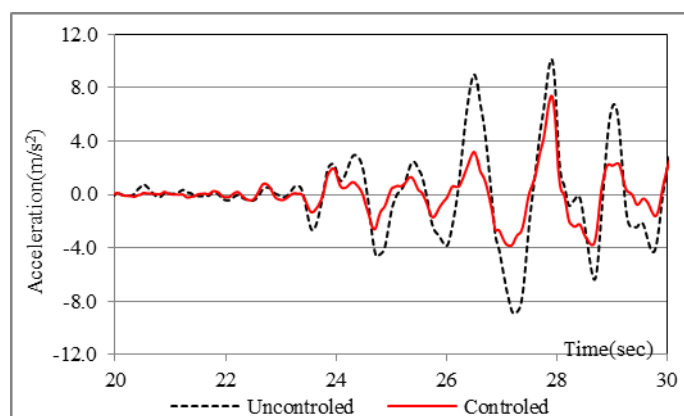
شکل ۲۲- نمایش شتاب در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله Cape Mendocino 1992



شکل ۲۳- نمایش جابجایی در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله N.Palm springs 1986



شکل ۲۴- نمایش سرعت در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله N.Palm springs 1986



شکل ۲۵- نمایش شتاب در تراز سقف ناشی از شتاب نگاشت زلزله N.Palm springs 1986

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به امکان سنجی استفاده از سیستم میراگر ویسکوز فعال در کنترل ارتعاشات ناشی از زلزله‌های حوزه‌ی دور و نزدیک پرداخته و عملکرد این سیستم کنترل بر پاسخ یک سیستم هفت درجه آزادی مرجع بررسی شد. طبقه‌بندی نتایج به شرح ذیل است:

- میراگر ویسکوز فعال پاسخ جابجایی، سرعت و شتاب سازه ۷ طبقه مورد بررسی تحت اثر رکوردهای منتخب زلزله‌ی حوزه دور را به ترتیب ۶۴، ۵۷ و ۵۱ درصد کاهش می‌دهد. بر اساس ماهیت رفتاری این زلزله‌ها و محتوای فرکانسی آن‌ها،

پدیده‌ی تاخیر زمانی که در پاسخ های حاصل از الگوریتم کنترل فعال وجود دارد، در این رکوردها به طور ملموس اثرگذار نبوده است.

- میراگر ویسکوز فعال پاسخ جابجایی، سرعت و شتاب سازه ۷ طبقه مورد بررسی تحت اثر رکوردهای منتخب زلزله‌ی حوزه نزدیک را به ترتیب ۵۶، ۵۶ و ۵۱ درصد کاهش می‌دهد.
- هرچند عملکرد الگوریتم کنترلی در زلزله‌های حوزه دور نیز مطلوب می باشد، ولی نمی توان از تاخیر زمانی موجود در کنترل پاسخ ها به دلیل ماهیت ضربه ای و شوک مانند زلزله حوزه نزدیک چشم پوشی نمود و اثر خفیف کنترل بر پاسخ های سازه ای در محدوده ابتدایی بازه زمانی رکورد واضح است. در غالب موارد الگوریتم کنترلی بر قله‌های ابتدایی پاسخ، اعمال کنترل ننموده و یا کنترل محدود بر آن ها اعمال نموده است و در ادامه روند توانسته کنترل مورد نظر بر پاسخ ها را ایجاد نماید. بنابراین با توجه به تاخیر زمانی ذاتی موجود، الگوریتم کنترل فعال در ابتدای بازه زمانی بر پاسخ ها کم اثر است.

## ۵- پیشنهادات

- از آن جا که هدف این پژوهش تنها امکان سنجی استفاده از سیستم میرگر ویسکوز فعال در کنترل پاسخ سازه در زلزله‌های حوزه دور و نزدیک بوده است، بدیهی است که مطالعات کامل تر در این خصوص ضروری است. لذا پیشنهاد می‌گردد:
- تحلیل‌ها برای سازه‌های با ارتفاع و تعداد طبقات متنوع تکرار گردد.
  - تحلیل‌ها به بررسی سازه‌های منظم و نامنظم با توزیع جرم و سختی متنوع گسترش یابد.
  - رفتار سایر ادوات کنترل فعال در کاهش پاسخ‌ها بررسی گردد.

## مراجع

- [1] Cheng, F. Y. Jiang, H. and Lou, K. (2008). Smart structures: Innovative systems for seismic response control. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group.
- [2] Soong, T.T. Constantinou, M.C. (1994). Passive and active structural vibration control in civil engineering. Springer-Verlag Wien. No.345
- [3] Nikoo K. Hazaveh. Geoffrey W. Rodgers, J. Chase, G. Pampanin, S. (2017). Experimental test and validation of a direction and displacement dependent viscous damper. Asce Journal of Engineering Mechanics. Volume 143. Issue 11
- [4] Younespour, A. Ghaffarzadeh, H. (2015). Structural active vibration control using active mass damper by block pulse functions. Sage Journals. Journal of Vibration and Control. Vol 21, Issue 14.
- [5] Don-HoYanga Ji. Hwan Shina Hyun. Wook Leeb Seoug. Ki Kima Moon. Kwak, K. (2017). Active vibration control of structure by active mass damper and multi-modal negative acceleration feedback control algorithm. Elsevier. Journal of Sound and Vibration. Volume 392, Pages 18-30.
- [6] Foti, D. (2014), On the Seismic Response of Protected and Unprotected Middle-Rise Steel Frames in Far-Field and Near-Field Areas, Shock and Vibration, Volume 2014, Article ID 393870.
- [7] Naderpour, H. Naji, N. Burkacki, D. Jankowski, R. (2019), Seismic Response of High-Rise Buildings Equipped with Base Isolation and Non-Traditional Tuned Mass Dampers, Applied Sciences. Vol. 9, P. 1201.
- [8] Ribakov, Y. Gluck, J. Reinhorn, A.M. (2001). Active viscous damping system for control of MDOF structures. Earthquake engineering and structural dynamics. Volume 30. Pages 195-212.
- [9] Soong, T.T. State-of-the-art review: Active structure control in civil engineering. (1988). Engineering Structures, Vol. 10, No. 2, pp. 73-84.
- [10] MATLAB and Statistics Toolbox. (Release 2012b). The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- [11] Chopra, A.C. (2002) Dynamics of structures: Theory and application to earthquake engineering. 2nd Edition, Prentice Hall Inc.
- [12] Pacific Earthquake Engineering Research Center. (2019). PEER Strong Ground Motion Databases. Available at: <https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-databases>.