

## کنترل لرزه‌های انفعالی ساختمان با استفاده از یک توده دارای جرم زیاد مستقر بر غلتک در تراز پی و متصل به طبقه فوقانی توسط یک سازه سخت

الهام پارسا، فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

محمود حسینی (نویسنده مسؤول)، دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله،

E-mail: [hosseini@iiees.ac.ir](mailto:hosseini@iiees.ac.ir)

**چکیده:** میراگر جرمی در سال‌های اخیر به‌عنوان وسیله‌ای برای کنترل انفعالی سازه‌ها در برابر نیروهای جانبی ناشی از اثر باد و زلزله مورد استفاده قرار گرفته است. این وسیله که شامل جرم، فنر و یک میراگر ویسکوز است، معمولاً در طبقه بالای ساختمان نصب می‌شود و جرم آن نسبت به جرم طبقه چندان قابل توجه نیست؛ اما در این مطالعه، جرم کنترلی دارای مقدار بسیار زیاد و متکی بر تکیه‌گاه‌های غلتکی در تراز پی ساختمان است و نیروی اینرسی آن از طریق سازه‌ای با سختی زیاد، که آن را به طبقه بالای ساختمان متصل می‌کند، به آن تراز منتقل شده و با تغییر رفتار دینامیکی سازه، پاسخ آن را در مقابل زلزله کاهش می‌دهد. فرض می‌شود در بخش میانی ساختمان فضایی خالی برای قرارگیری سازه متصل‌کننده جرم کنترلی به بام وجود دارد. در این مقاله، میزان تأثیر استفاده از میراگر جرمی پیشنهادی در کاهش پاسخ لرزه‌ای در سه ساختمان پنج، هشت و یازده طبقه مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، تحلیل‌های تاریخچه زمانی برای ساختمان‌های معمولی و ساختمان‌های دارای جرم کنترلی تحت هفت نداشت سه مؤلفه‌ای زلزله با مقادیر PGA برابر با 0/3 تا 0/8 شتاب گرانشی انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از جرم کنترلی پیشنهادی می‌تواند به طور میانگین سبب کاهش پاسخ تغییر مکانی ساختمان‌ها تا حدود 40 درصد شود.

**کلیدواژه‌ها:** کنترل انفعالی سازه‌ها، جرم کنترلی، تحلیل تاریخچه زمانی، نداشت‌های سه مؤلفه‌ای

### 1 - مقدمه

استفاده از این نوع میراگر در کارهای مهندسی به پیشنهاد فرام (Frahm) برای کاهش ارتعاش در مقابل نیروهای هارمونیک باز می‌گردد [2]. به نظر می‌رسد اولین سازه‌ای که در آن از میراگر جرمی متوازن استفاده شده، برج سنترپوینت (Centerpoint) در شهر سیدنی استرالیا است [3]. از میراگر جرمی با جرم بزرگ 660 در برج 101 شهر تایپه تایوان با ارتفاع 508 متر که یکی از بلندترین برج‌های دنیا می‌باشد، استفاده شده است [4]. هرچند کاربردهای اولیه میراگر جرمی در بهبود رفتار ساختمان‌ها در برابر نیروهای ناشی از

کنترل سازه یکی از فن‌آوری‌های نسبتاً جدید در زمینه طراحی مقاوم سازه‌ها در برابر زلزله است. در این روش، بهبود پاسخ دینامیکی سازه‌ها با استفاده از تغییر در جرم، سختی، میرایی و یا با تأمین نیروهای فعال و یا انفعالی در سازه صورت می‌گیرد. کارایی ابزارهای کنترل سازه برای بهبود پاسخ سازه‌ها در مقابل باد و زلزله تأیید شده است [1]. میراگر جرمی متوازن، سیستمی شامل جرم، فنر و میراگر ویسکوز است که به سازه اصلی متصل می‌گردد. ایده اولیه

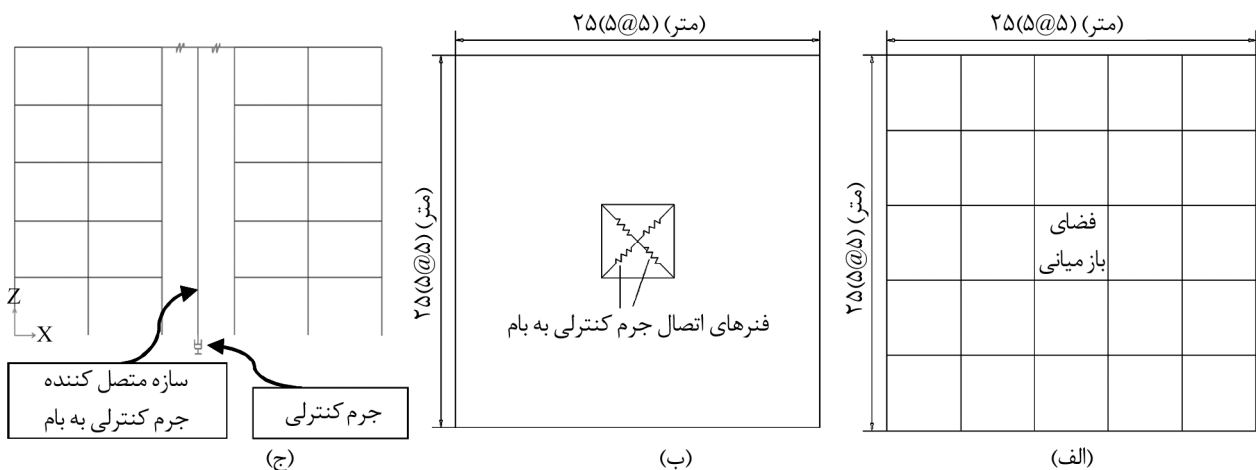
میانی آن‌ها فضایی خالی برای تأمین نور و تهویه بهتر وجود دارد. این فضا جهت نصب سازه متصل‌کننده جرم کنترلی به بام ساختمان می‌تواند به صورتی بسیار مناسب مورد استفاده قرار گیرد. برای بررسی اثربخشی ایده مطرح‌شده، سه ساختمان فولادی منظم با تعداد طبقات پنج، هشت و یازده در دو حالت متداول و نیز مجهز به جرم کنترلی مطالعه و مقایسه شده که جزئیات بررسی در ادامه آورده شده است.

## 2 - معرفی ساختمان‌های مورد مطالعه

ساختمان‌های در نظر گرفته‌شده به منظور بررسی میزان کارایی سیستم جرم کنترلی پیشنهادی شامل سه ساختمان فولادی منظم با تعداد طبقات پنج، هشت و یازده می‌باشد. خاک ساختمانی از نوع 2 و منطقه دارای لرزه‌خیزی با خطر بسیار بالا، طبق استاندارد 2800 ایران، فرض شده است. ساختمان‌های فرض شده طبق شکل (1) دارای فضای باز میانی هستند که محل قرارگیری سازه متصل‌کننده جرم کنترلی به بام ساختمان است و جرم کنترلی نیز در تراز پی به صورت متکی بر تکیه‌گاه‌های غلتکی استقرار یافته است. همان‌گونه که در شکل (1) نشان داده شده سازه متصل‌کننده جرم کنترلی به بام که در این مطالعه برای سادگی با یک ستون صلب مدل گردیده، در مرکز ساختمان از پی تا بام ادامه دارد و در نقطه وسط بام به وسیله چهار فنر به اسکلت ساختمان وصل می‌شود.

اثر باد بوده، اما در دهه‌های اخیر کاربرد آن برای بهبود رفتار ساختمان در برابر نیروهای ناشی از اثر زلزله هم مورد بررسی قرار گرفته است. به‌عنوان نمونه سادک و همکاران [5] خصوصیات بهینه میراگر برای سازه‌ای که تحت تأثیر تحریک پایه قرار می‌گیرد را ارائه نمودند. در دهه اخیر مطالعات آزمایشگاهی روی میراگر جرمی متوازن نیز گسترش یافت. به‌عنوان نمونه می‌توان به مطالعات انجام‌شده توسط باری و رفیک [6] برای سازه یک درجه آزاد اشاره نمود. شکل دیگری از به‌کارگیری نیروی اینرسی و جرم کنترلی با استفاده از جرم‌های متصل به فنرهای پیش‌فشرده در ساختمان نیز توسط حسینی و کریمیان [7] معرفی شده است.

در تمامی مطالعات پیشین، محل استقرار جرم یا جرم‌های کنترلی در طبقات بالایی ساختمان و مقدار جرم یا جرم‌های کنترلی در مقایسه به جرم ساختمان ناچیز بوده است. در این مقاله ایده استفاده از جرم کنترلی در کاهش پاسخ لرزه‌ای با به‌کارگیری یک جرم بسیار بزرگ دارای تکیه‌گاه‌های غلتکی مستقر در تراز پی ساختمان و متصل نمودن جرم کنترلی با یک سازه نسبتاً سبک و سخت به بام ساختمان مورد بررسی قرار گرفته است. محل قرارگیری سازه اتصال‌دهنده جرم کنترلی به بام ساختمان در فضای خالی میان ساختمان فرض شده است. در واقع فرم معماری بسیاری از ساختمان‌ها، از جمله مراکز بزرگ خرید، بسیاری از ساختمان‌های اداری و تجاری و برخی از ساختمان‌های مسکونی به‌گونه‌ای است که در بخش



شکل (1): (الف) پلان طبقات، (ب) بام و (ج)، ساختمان‌های مورد مطالعه و مقطع ساختمان پنج طبقه که در آن جرم کنترلی و سازه متصل‌کننده آن به بام نشان داده شده است.

اشکال (9) تا (15) ارائه شده است. همان‌گونه که در اشکال (2) تا (8) ملاحظه می‌شود، زلزله‌های انتخاب‌شده از لحاظ محتوای فرکانسی طیف گسترده‌ای را پوشش می‌دهند.

جدول (1): مشخصات مدل‌ها.

مدل	تعداد طبقات	پریود اصلی (ثانیه)
1	5	0/54
2	8	0/82
3	11	1/2

جدول (2): مشخصات شتاب‌نگاشت‌های انتخاب‌شده برای تحلیل.

مدت زلزله (ثانیه)	شتاب بیشینه زمین (g) در سه راستا			نام زلزله و سال رخداد
	0/17	0/27	0/32	
29/97	0/17	0/27	0/32	سان‌فرناندو (1971)
36/33	0/27	0/32	0/35	فریولی، ایتالیا (1976)
23/78	0/18	0/33	0/41	طبس (1978)
27/08	0/15	0/32	0/43	کویوت‌لیک (1979)
39/94	0/17	0/43	0/30	نورث‌ریج، 1994 (P0928)
24/96	0/40	0/88	0/64	نورث‌ریج، 1994 (P1021)
47/94	0/34	0/60	0/82	کوبه (1995)

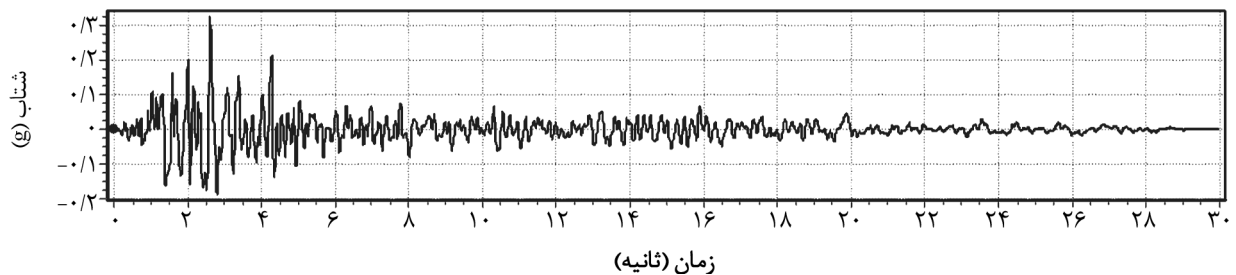
این سازه در واقع خرابی لوله‌ای، یا سازه‌ای مشابه، با سختی نسبتاً زیاد و جرم نسبتاً کم می‌باشد. جرم کنترلی مستقر در تراز پایه متکی بر تکیه‌گاه‌های غلتکی فرض می‌شود و در نتیجه امکان حرکات انتقالی در صفحه افقی را دارد، اما امکان چرخش و حرکت در راستای قائم را ندارد. ساختمان‌های در نظر گرفته شده ابتدا مدل‌سازی و سپس تحلیل استاتیکی و بر اساس ضوابط آیین‌نامه *AISC 89-ASD* طراحی شده‌اند.

سیستم جانبی تمام مدل‌ها از نوع قاب خمشی فولادی منظم انتخاب شده است. پریود اصلی مدل‌ها در جدول (1) ارائه شده است.

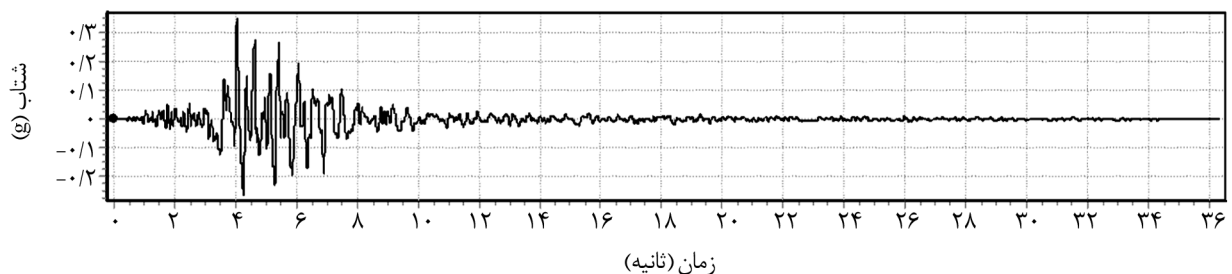
### 3 - انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها و انجام تحلیل‌های تاریخی زمانی

شتاب‌نگاشت‌های سه مؤلفه‌ای استفاده‌شده در این پژوهش بر اساس نوع خاک انتخاب شده است که با برنامه *SeismoSignal* فیلتر و اصلاح شده‌اند.

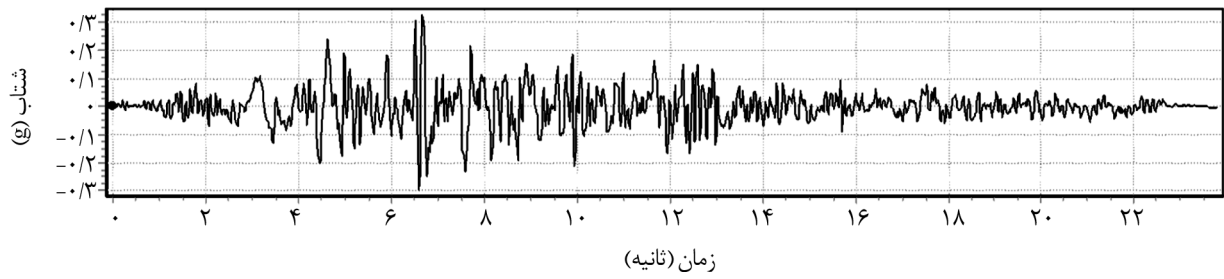
مشخصات شتاب‌نگاشت‌های انتخاب‌شده در جدول (2) آورده شده است. همچنین تاریخچه‌های مؤلفه‌های غالب آن‌ها در اشکال (2) تا (8) و طیف شبه سرعت زلزله‌ها در



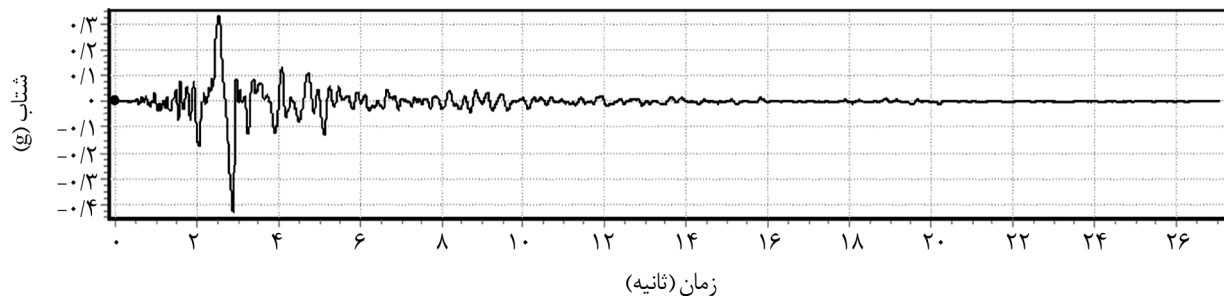
شکل (2): شتاب‌نگاشت غالب زلزله سان‌فرناندو.



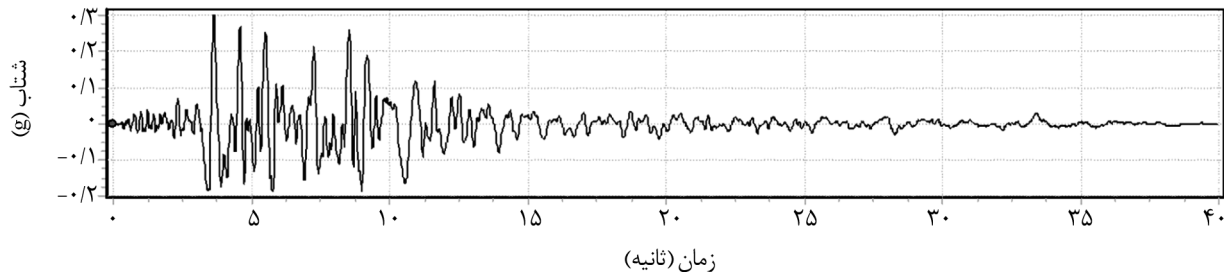
شکل (3): شتاب‌نگاشت غالب زلزله فریولی.



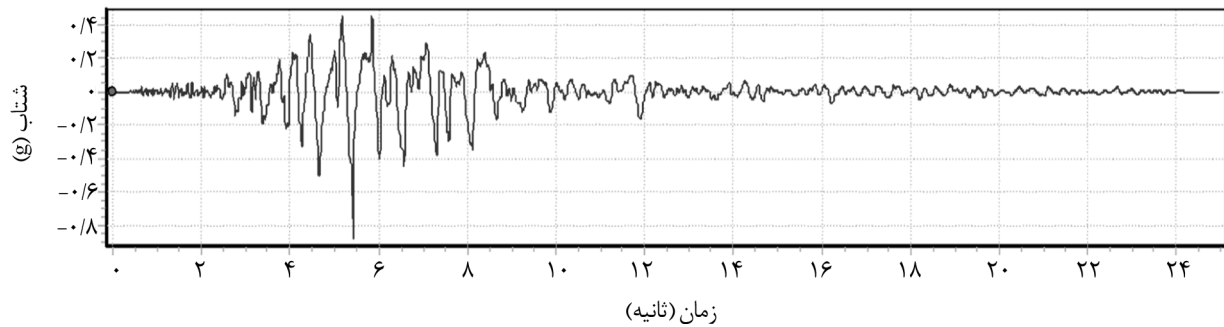
شکل (4): شتاب‌نگاشت غالب زلزله طبس.



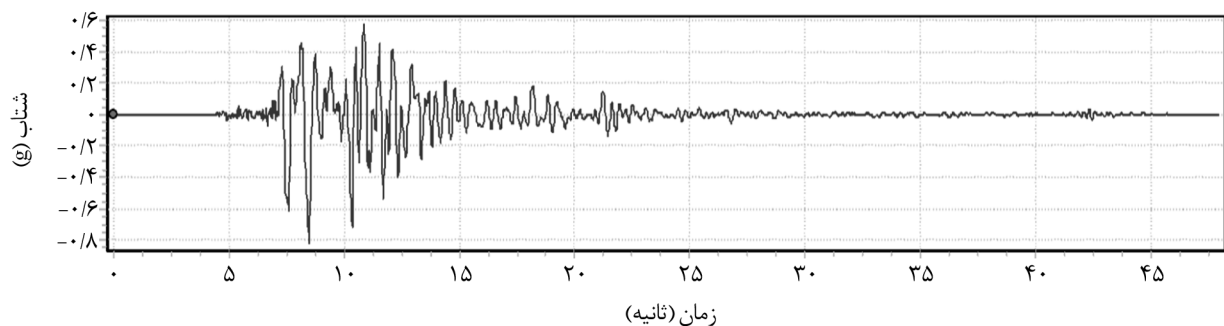
شکل (5): شتاب‌نگاشت غالب زلزله کویوتو لایک.



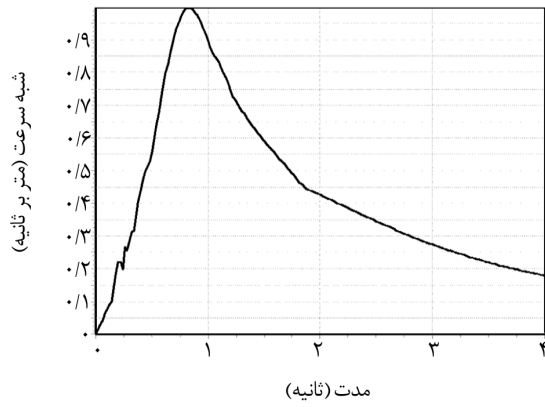
شکل (6): شتاب‌نگاشت غالب زلزله نورثریج (P0928).



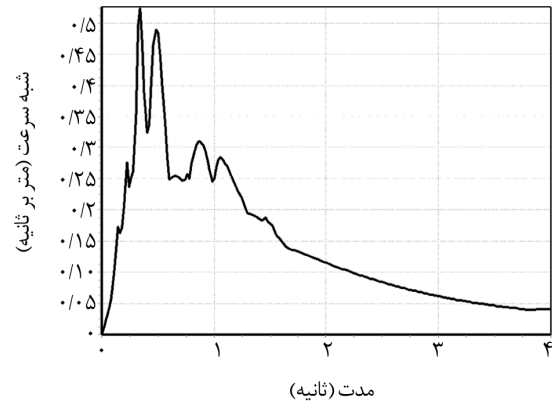
شکل (7): شتاب‌نگاشت غالب زلزله نورثریج (P1021).



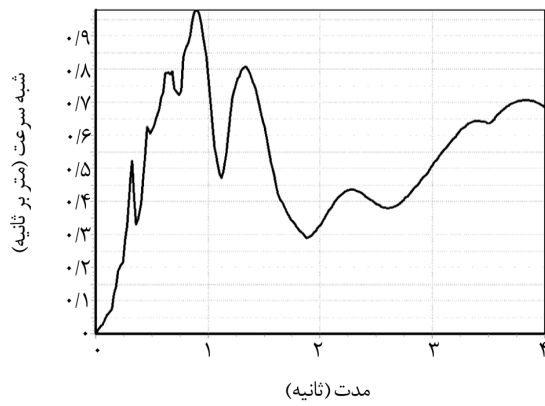
شکل (8): شتاب‌نگاشت غالب زلزله کوبه.



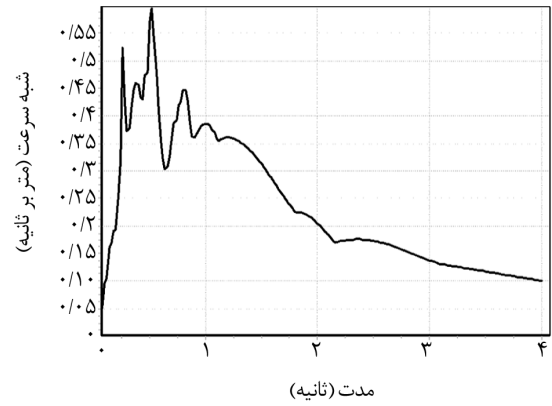
شکل (12): طیف شبه سرعت زلزله کویوتو لایک.



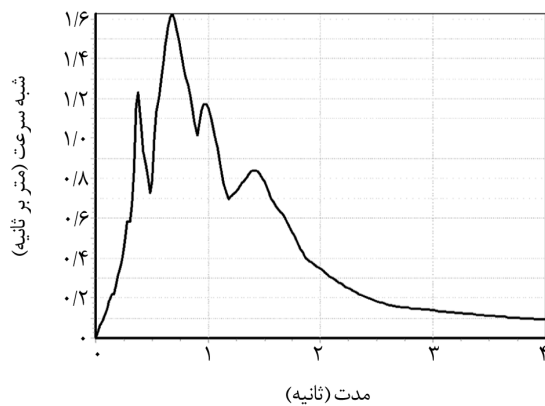
شکل (9): طیف شبه سرعت زلزله سان فرناندو.



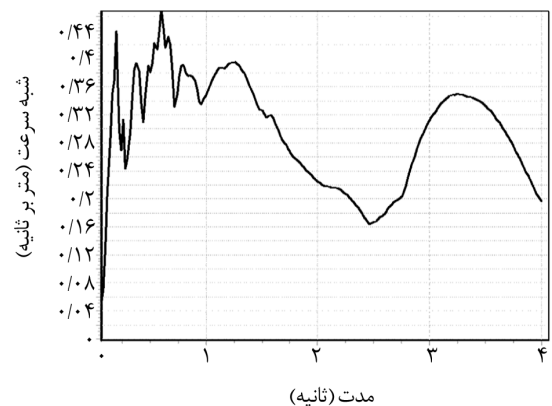
شکل (13): طیف شبه سرعت زلزله (P0928).



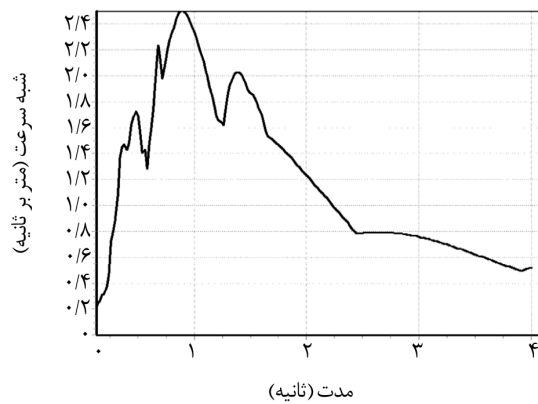
شکل (10): طیف شبه سرعت زلزله فریولی.



شکل (14): طیف شبه سرعت زلزله (P1021).



شکل (11): طیف شبه سرعت زلزله طبس.



شکل (15): طیف شبه سرعت زلزله کوبه.

#### 4 - نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی

برای بررسی اثر جرم کنترلی در کاهش پاسخ تغییرمکانی ساختمان‌ها، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی یکبار برای مدل‌های بدون جرم کنترلی و یکبار برای مدل‌های دارای جرم کنترلی صورت گرفته و نتایج مقایسه شده‌اند.

جداول (3) تا (5) نتایج تحلیل‌های دینامیکی ساختمان‌ها بدون جرم کنترلی و جداول (6) تا (8) اثر به‌کارگیری جرم کنترلی را در کاهش پاسخ تغییرمکانی ساختمان‌ها نشان می‌دهند.

جدول (4): نتایج تحلیل‌های دینامیکی ساختمان هشت طبقه بدون جرم کنترلی.

تغییرمکان بیشینه در دو جهت		زلزله
جهت x	جهت y	
11/74	28/31	سان‌فرناندو (1971)
13/42	14/18	فریولی، ایتالیا (1976)
17/80	9/70	طیس (1978)
23/60	5/20	کویوت‌لیک (1979)
40/50	29/00	نورث‌ریج، 1994 (p0928)
29/83	24/33	نورث‌ریج، 1994 (p1021)
53/20	53/24	کوبه (1995)

جدول (3): نتایج تحلیل‌های دینامیکی ساختمان پنج طبقه بدون جرم کنترلی.

تغییرمکان بیشینه در دو جهت		زلزله
جهت x	جهت y	
7/50	21/34	سان‌فرناندو (1971)
9/31	12/38	فریولی، ایتالیا (1976)
13/74	12/27	طیس (1978)
12/12	6/19	کویوت‌لیک (1979)
7/63	23/67	نورث‌ریج، 1994 (p0928)
30/49	32/42	نورث‌ریج، 1994 (p1021)
36/99	25/44	کوبه (1995)

جدول (5): نتایج تحلیل‌های دینامیکی ساختمان یازده طبقه بدون جرم کنترلی.

تغییرمکان بیشینه در دو جهت		زلزله
جهت x	جهت y	
9/08	12/93	سان‌فرناندو (1971)
13/68	20/10	فریولی، ایتالیا (1976)
13/52	30/40	طیس (1978)
24/96	21/17	کویوت‌لیک (1979)
51/82	31/27	نورث‌ریج، 1994 (p0928)
32/49	28/36	نورث‌ریج، 1994 (p1021)
102/00	37/16	کوبه (1995)

جدول (6): اثر جرم کنترلی در کاهش پاسخ بیشینه تغییرمکانی ساختمان پنج طبقه تحت اثر زلزله‌های انتخابی.

زلزله	سختی فنر (کیلوگرم نیرو بر سانتیمتر)	جرم کنترلی (تن)	پریود غالب (ثانیه)	تغییرمکان بیشینه کاهش یافته بام در جهت x (سانتیمتر)	تغییرمکان بیشینه کاهش یافته بام در جهت y (سانتیمتر)	کاهش پاسخ در جهت y (درصد)	کاهش پاسخ در جهت x (درصد)
سان‌فرناندو (1971)	1/E+07	100	0/69	4/2	9/25	56/65	44/00
فریولی، ایتالیا (1976)	1/E+07	300	0/967	8/98	10/50	15/19	3/54
طیس (1978)	1/E+07	100	0/70	7/86	7/83	36/19	42/79
کویوت‌لیک (1979)	1/E+06	50	0/798	9/7	4/54	26/66	19/97
نورث‌ریج، 1994 (p0928)	1/E+05	100	3/19	7/5	19/2	18/88	1/70
نورث‌ریج، 1994 (p1021)	1/E+08	200	0/77	23	18/08	44/23	24/57
کوبه (1995)	1/E+06	200	1/53	25	17	33/18	32/41

جدول (7): اثر جرم کنترلی در کاهش پاسخ بیشینه تغییرمکانی ساختمان هشت طبقه تحت اثر زلزله‌های انتخابی.

زلزله	سختی فنر (کیلوگرم نیرو بر سانتیمتر)	جرم کنترلی (تن)	پریود غالب (ثانیه)	تغییرمکان بیشینه کاهش یافته بام در جهت x (سانتیمتر)	تغییرمکان بیشینه کاهش یافته بام در جهت y (سانتیمتر)	کاهش پاسخ در جهت x (درصد)	کاهش پاسخ در جهت y (درصد)
سان‌فرناندو (1971)	1/E+07	300	1/27	8/05	8/80	31/43	68/92
فریولی، ایتالیا (1976)	1/E+07	100	0/97	9/40	8/98	29/96	36/67
طیس (1978)	1/E+07	200	1/12	9/53	7/94	46/46	18/14
کویوت‌لیک (1979)	1/E+05	300	5/57	22/70	4/92	3/81	5/38
نورث‌ریج، 1994 (P0928)	1/E+06	200	1/65	18/62	16/32	54/02	43/72
نورث‌ریج، 1994 (P1021)	1/E+06	200	1/65	18/75	16/26	37/14	33/17
کوبه (1995)	1/E+07	400	1/41	28/16	16/32	47/07	69/35

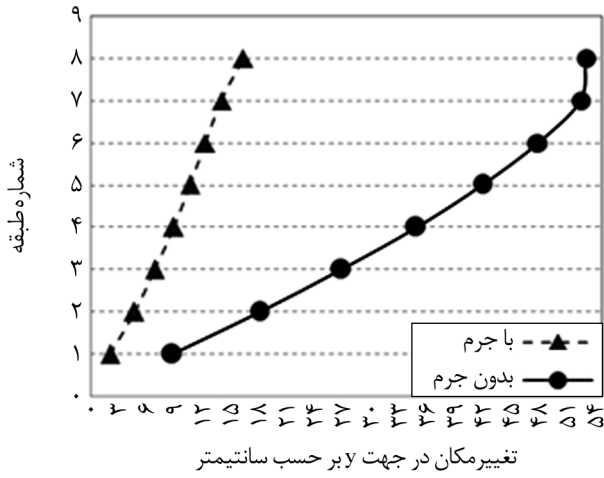
جدول (8): اثر جرم کنترلی در کاهش پاسخ بیشینه تغییرمکانی ساختمان یازده طبقه تحت اثر زلزله‌های انتخابی.

زلزله	سختی فنر (کیلوگرم نیرو بر سانتیمتر)	جرم کنترلی (تن)	پریود غالب (ثانیه)	تغییرمکان بیشینه کاهش یافته بام در جهت x (سانتیمتر)	تغییرمکان بیشینه کاهش یافته بام در جهت y (سانتیمتر)	کاهش پاسخ در جهت x (درصد)	کاهش پاسخ در جهت y (درصد)
سان‌فرناندو (1971)	1/E+08	200	1/597	9/4	11/4	3/5	11/8
فریولی، ایتالیا (1976)	1/E+06	200	1/930	10/7	13/3	21/7	33/8
طیس (1978)	1/E+06	400	1/600	13/01	16/86	3/8	44/5
کویوت‌لیک (1979)	1/E+07	400	1/950	16/89	12/74	32/3	39/8
نورث‌ریج، 1994 (P0928)	1/E+07	250	1/700	14/35	17/78	72/3	43/1
نورث‌ریج، 1994 (P1021)	1/E+07	300	3/910	22/2	19/2	31/6	32/3
کوبه (1995)	1/E+08	200	1/596	78/01	38/35	23/5	3/2

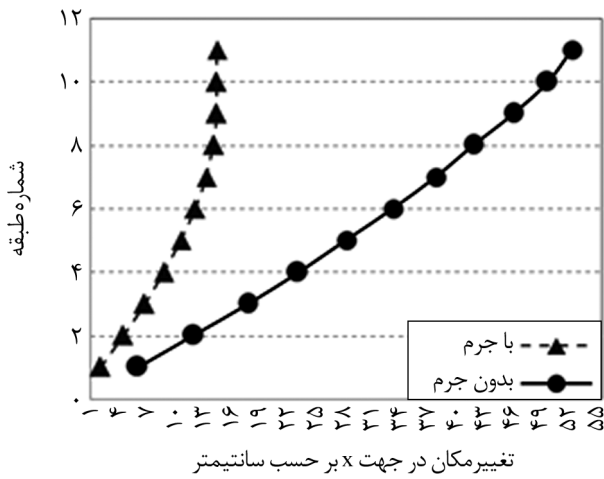
اشکال (17) و (18) مشاهده می‌شود. بیشترین کاهش در پاسخ برای زلزله نورث‌ریج (P0928) در ساختمان یازده طبقه، در شکل (19) مشاهده می‌شود. کمترین کاهش پاسخ تغییرمکان در زلزله سان‌فرناندو مشاهده شده که با افزایش میرایی جرم کنترلی، کاهش تغییرمکان تقریباً ناچیز است؛ یعنی با افزایش میرایی تغییرمکان کاهش نمی‌یابد.

در اشکال (20) تا (22) با افزایش سختی فنر در جرم ثابت تغییرمکان سازه‌ها ابتدا کاهش و از سختی به بعد افزایش یافته است. در شکل‌های (23) تا (25) نیز با افزایش

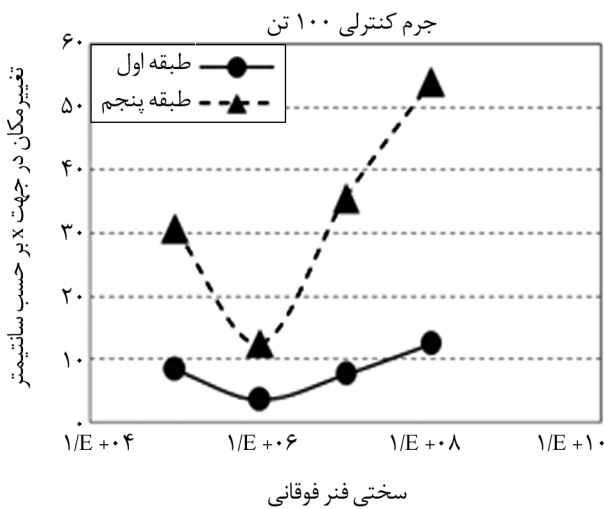
همان‌گونه که در جداول (6) تا (8) ملاحظه می‌گردد برای میراگر جرمی مقادیر جرم و سختی گوناگونی به کار رفته است. در واقع، برای هر ساختمان و هر زلزله می‌توان مقادیر بهینه جرم و سختی میراگر را بر اساس تحلیل‌های متعدد به دست آورد. در شکل (16) ساختمان پنج طبقه بیشترین کاهش تغییرمکان در زلزله سان‌فرناندو روی داده که PGA آن نسبت به شش زلزله دیگر کمتر است و در محدوده زلزله مجاز استاندارد 2800 قرار دارد. در ساختمان هشت طبقه بیشترین کاهش در پاسخ در حالت با جرم کنترلی، در زلزله‌های کوبه و سان‌فرناندو است که در



شکل (18): مقایسه تغییر مکان ساختمان هشت طبقه - حالت با جرم و بدون جرم در زلزله کوبه.

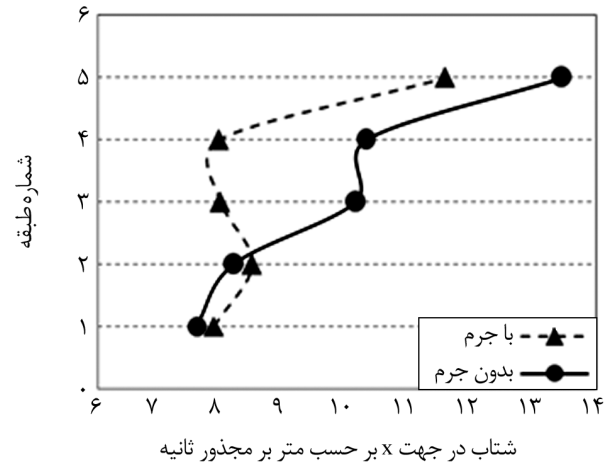
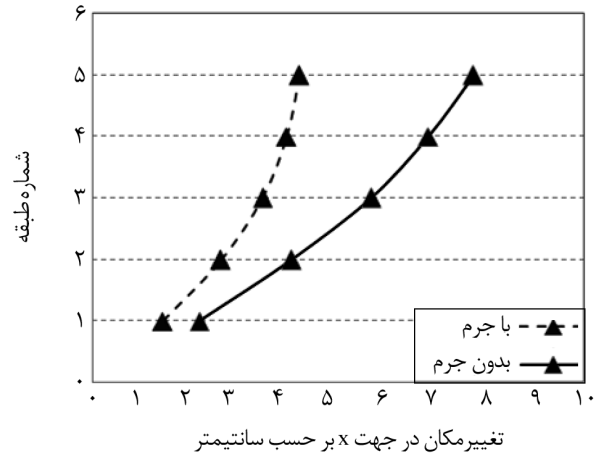


شکل (19): مقایسه تغییر مکان ساختمان یازده طبقه - حالت با جرم و بدون جرم در زلزله نورث ریج (P0928).

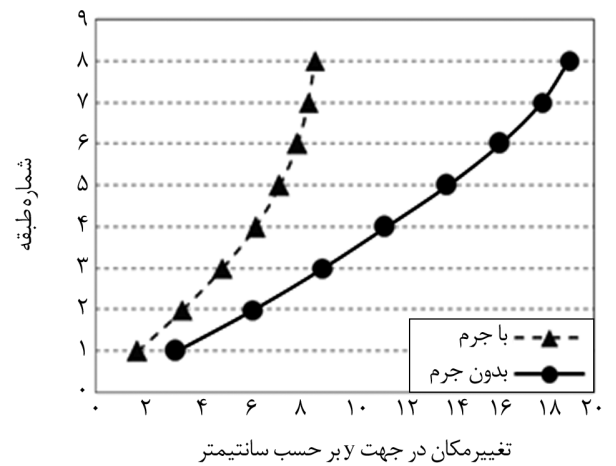


شکل (20): تأثیر تغییر سختی فنر بر تغییر مکان ساختمان پنج طبقه در زلزله نورث ریج (P1021).

جرم در سختی ثابت فنر اتصال، تغییر مکان تا نقطه‌ای در زلزله نورث ریج کاهش و از آن نقطه با افزایش جرم تغییر مکان افزایش یافته است.

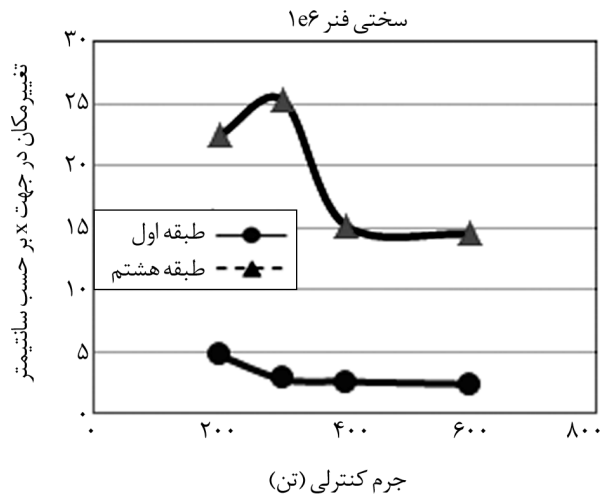


شکل (16): بیشینه تغییر مکان و شتاب طبقات ساختمان پنج طبقه در حالت با و بدون جرم کنترلی در زلزله سان فرناندو.

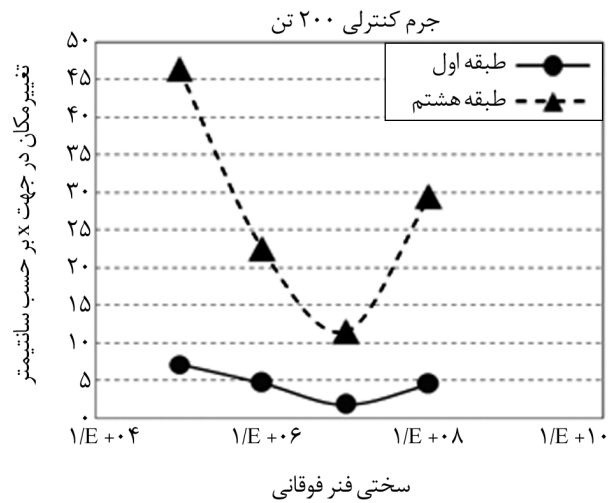


شکل (17): مقایسه تغییر مکان ساختمان هشت طبقه - حالت با جرم و بدون جرم کنترل در زلزله سان فرناندو.

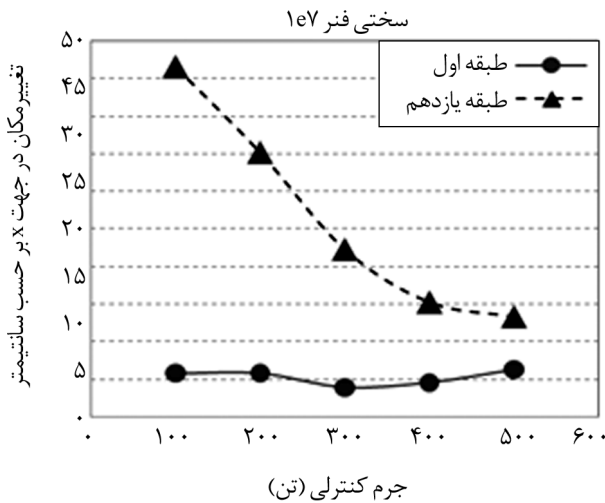




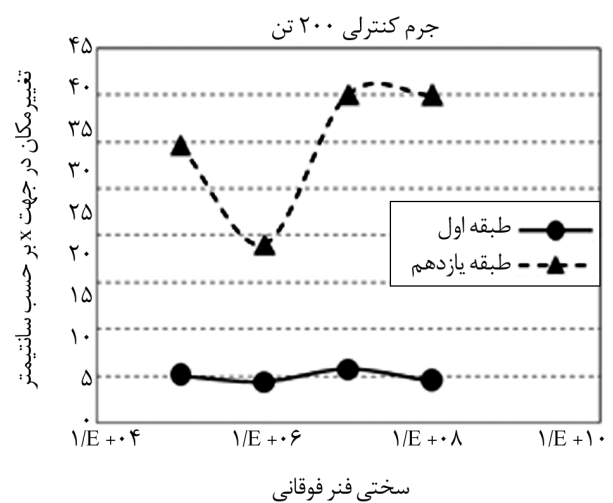
شکل (24): تأثیر تغییر جرم بر تغییر مکان ساختمان هشت طبقه در زلزله نورث ریج (P1021).



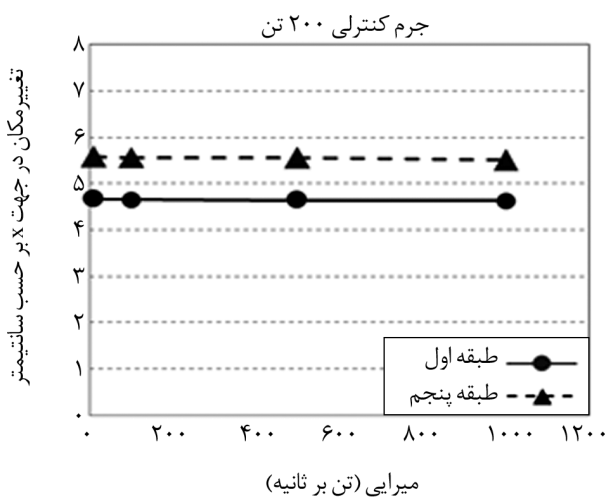
شکل (21): تأثیر تغییر سختی فدر بر تغییر مکان ساختمان هشت طبقه در زلزله نورث ریج (P1021).



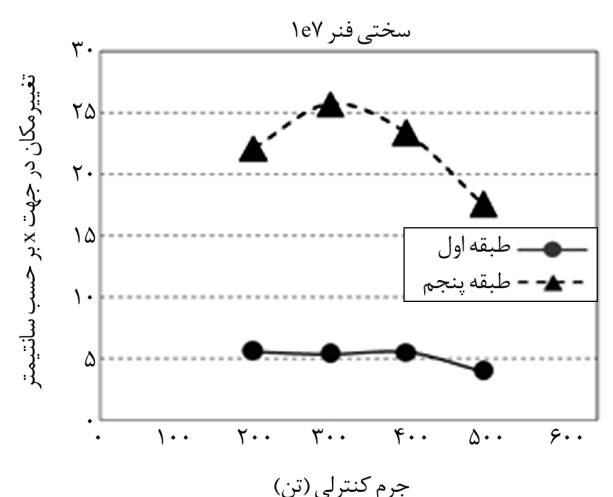
شکل (25): تأثیر تغییر جرم بر تغییر مکان ساختمان یازده طبقه در زلزله نورث ریج (P1021).



شکل (22): تأثیر تغییر سختی فدر بر تغییر مکان ساختمان یازده طبقه در زلزله نورث ریج (P1021).



شکل (26): تأثیر تغییر میرایی بر تغییر مکان ساختمان پنج طبقه در زلزله نورث ریج (P1021).



شکل (23): تأثیر تغییر جرم بر تغییر مکان ساختمان پنج طبقه در زلزله نورث ریج (P1021).

## 5 - نتیجه گیری

5. Sadek, F., Mohraz, B., Taylor A.W., and Chung, R.M. (1997) A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**, 617-635.
6. Rafik, R. Gerges and Barry, J. Vickery (2003) parametric experimental study of wire rope spring tuned mass dampers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **91**, 1363-1385.
7. Hosseini, M., Karimiyan, M., and Karimiyan, S. (2012) An innovative idea for controlling the seismic response of structures based on the use of inertia forces. *Proceedings of the 15WCEE*, Lisbon, Portugal.

8. پارسا، الهام (1392) کنترل لرزه‌ای غیرفعال ساختمان‌های متوسط و کوتاه با فضای باز میانی دربرگیرنده توده جرمی مستقر در تراز پی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر محمود حسینی، گروه مهندسی عمران، دانشکده تحصیلات تکمیلی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.

نتایج حاصله از این پژوهش نشان می‌دهد تأثیر و کارایی جرم کنترلی نسبتاً بزرگ در تراز پایه در کاهش پاسخ لرزه‌ای در ساختمان‌های کوتاه و متوسط قابل توجه است. کاهش تغییرمکان بیشینه طبقات در سازه پنج طبقه تا 56/65، کاهش تغییرمکان بیشینه طبقات در سازه هشت طبقه تا 69/35 و کاهش تغییرمکان بیشینه طبقات در سازه یازده طبقه تا 72/31 است. با افزایش تعداد طبقات برای زلزله‌های دارای بیشینه شتاب حدود 0/35g جرم کنترل افزایش می‌یابد. بیشترین کاهش تغییرمکان به‌طور میانگین در زلزله کوبه در ساختمان هشت و یازده طبقه اتفاق افتاده است. به‌طور میانگین بهترین پاسخ با جرم کنترلی در ساختمان پنج طبقه در زلزله با PGA پایین حدود 0/35g و برای ساختمان هشت و یازده طبقه در زلزله‌های قوی، 0/8g اتفاق افتاده است. در زلزله کوبه در حالت تحلیل با مؤلفه قائم زلزله در ساختمان پنج طبقه کاهش تغییرمکان حاصل شده تقریباً 10 درصد کمتر از حالت تحلیل دو مؤلفه افقی است.

## مراجع

1. Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughy, T.K., Chassiakos, A.G., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.F., and Yao, J.T. (1997) Structural control: past, present and future. *Journal of Engineering Mechanics*, **123**(9), 897-966.
2. Soong, T.T. and Dargush, G.F. (1997) *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. John Wiley and Sons, New York.
3. Kwok, K.C.S. (1984) Damping increase in building with tuned mass damper. *Journal of Engineering Mechanics*, **110**(11), 1645-1649.
4. Haskett, T., Breukelman, B., Robinson, J., and Kottelenberg, J. (2003) Tuned mass dampers under excessive structural excitation. *Proceedings of Extreme Loading Conference*, Toronto, ON, Canada.