



University Of Qom



Seismic Vibration Control of the Special Truss Moment Frame (STMF) Using Buckling Restrained Braces and Tuned Mass Dampers

Sasan Mostaghimi Tehrani¹, Morteza Raissi Dehkordi^{2✉}, Elham Rajabi³

1. School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. E-mail: sasan_mostaghimi@alumni.iust.ac.ir
2. Corresponding author, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. E-mail: mraissi@iust.ac.ir
3. Qualitative and Quantitative Analysis of Fluids and Environmental Research Group, Department of Civil Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran. E-mail: rajabi@tafreshu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 16 Feb 2025
Revised 28 Jul 2025
Accepted 09 Aug 2025
Published 13 Aug 2025

Keywords:
Special truss moment frame,
Buckling restrained brace,
Tuned mass damper,
Incremental dynamic analysis.

ABSTRACT

Vibration control of structures includes passive, semi-active, active and hybrid control. Tuned mass dampers (TMDs) as one of the most effective methods for passive control of structures are in the focus of researches in recent years. In this paper, 10-story special truss moment frame (STMF), in the state without buckling restrained braces (BRBs), with the presence of BRBs, as well as the addition of TMDs on the structure equipped with BRBs, has been investigated under different earthquakes, regardless of the effect of the site. In this regard, TMDs with a mass ratio of 2% of the mass of the structure have been installed at six points on the roof of the structure. The results suggest the appropriate performance of TMDs and BRBs together. The amount of improvement in the results compared to the case without BRBs in structure is 27.95%. The effect of adding TMDs in reducing the vibrations of the structure is almost the same as the case with BRBs.

Cite this article: Mostaghimi Tehrani S, Raissi Dehkordi M, Rajabi E. Seismic Vibration Control of the Special Truss Moment Frame (STMF) Using Buckling Restrained Braces and Tuned Mass Dampers. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(2): 17-30. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.12392.1603>



Introduction

One of the most effective methods for structural control is the use of passive tuned mass dampers (TMDs). These dampers typically have a mass of about 1 to 5 percent of the total weight of the structure and are connected to a location in the structure, usually the one with the greatest displacement, via a spring and a damper. TMDs are generally tuned to the fundamental frequency of the structure. When this frequency is excited, the TMD, through its out-of-phase motion relative to the structure, absorbs and dissipates seismic energy. It is important to note that the effectiveness of both passive and active TMDs is highly dependent on the optimization of their parameters. Most studies on TMDs have aimed to determine optimal values for parameters such as stiffness, damping, and sometimes mass under various loading conditions modeled in different ways. In these studies, various criteria, such as minimizing maximum displacement, acceleration, and velocity of the structure, have been used to find the optimal parameters.

Modeling and Evaluation Procedure

In this study, a ten-story special truss moment frame (STMF) structure has been subjected to incremental dynamic analysis (IDA). The structure was modeled in OpenSEES under three different scenarios: without BRBs, with BRBs, and with both BRBs and TMDs. In order to model the structures and investigate the objectives of this study, the structures presented by Pekcan et al. [23] in 2009 have been used. Their structure is a STMF, with and without BRBs. The steel behavior in the Opensees software was defined using the *uniaxialMaterial Steel02* command. Beam and column elements were defined as *nonlinearBeamColumn*, which is a nonlinear element. The nonlinear beam-column element accounts for the distributed plasticity along the length of the element. Beam and column cross-sections were created using the section fiber command. To account for the P-Delta effect, the *geomTransf PDelta* command was used. The mass ratio of the TMD is 2% of the total mass of the structure. The frequency and

damping ratio of the TMD are determined using Equations (1) and (2) proposed by Pastia and Luca [25]. In the equations used in this study, the objective function for optimization is the reduction of displacement at the location where the TMD is installed.

$$f_{TMD} = \frac{f_1}{1 + \mu} \quad (1)$$

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} \quad (2)$$

f_{TMD} and f_1 are the frequencies of the TMD and the structure, respectively. μ is the mass ratio, and ξ_{opt} is the optimal damping ratio of the TMD. The mass of the TMD is installed at six points on top of the structure, at the ends of the roof columns. In order to model the stiffness and damping of the TMD, elastic and viscous materials were used respectively in the OpenSEES software.

Results

By installing multiple TMDs at six points on the roof of the structure, a significant reduction in roof displacement response is observed compared to both previous cases (with and without BRBs). The highest displacements are recorded in the case where the structure is not equipped with any control devices, such as TMDs or BRBs. In addition to increased roof displacement in this case, residual displacements are also present in the structure after the earthquake loading ends, which increase with higher peak ground acceleration. Table 1 shows the average values of improvement in the peak roof displacement. Tables 2 and 3 present the average improvement in the peak roof acceleration and base shear of the structures with various control systems, respectively.

Conclusion

According to the analysis results, the structure without BRBs enters the nonlinear range with increasing peak ground accelerations, leading to the formation of plastic hinges. These plastic hinges cause the structure to vibrate around new axes, and residual displacements remain evident after the earthquake loading has ended.

Table 1. Average of improved roof displacement

PGA(g)	With BRB/Without BRB (%)	With BRB+TMD/Without BRB (%)	With BRB+TMD/With BRB (%)
0.1	7.15	27.06	21.44
0.2	4.95	24.87	20.96
0.3	3.10	24.20	21.78
0.4	7.02	26.70	21.16
0.5	4.22	24.94	21.63
0.6	1.84	21.83	20.36
0.7	0.05	19.76	19.72
0.8	16.04	32.84	20.01
0.9	21.80	37.44	20.00
1	25.03	39.95	19.90

Table 2. Average improved values of maximum roof acceleration

PGA(g)	With BRB/Without BRB (%)	With BRB+TMD/Without BRB (%)	With BRB+TMD/With BRB (%)
0.1	24.36	42.46	23.69
0.2	20.04	38.04	22.31
0.3	12.66	32.20	23.26
0.4	10.40	27.56	23.24
0.5	10.30	23.43	22.04
0.6	10.70	19.88	20.90
0.7	12.69	18.25	22.15
0.8	12.64	17.12	21.78
0.9	12.44	17.40	21.82
1	13.93	19.06	20.96

Table 3. Average improved values of maximum base shear

PGA(g)	With BRB/Without BRB (%)	With BRB+TMD/Without BRB (%)	With BRB+TMD/With BRB (%)
0.1	23.37	41.26	22.79
0.2	20.07	37.40	21.31
0.3	11.78	31.12	21.25
0.4	10.32	26.56	22.23
0.5	10.20	22.33	21.88
0.6	10.12	18.77	19.45
0.7	11.62	17.21	21.21
0.8	11.67	16.12	20.67
0.9	11.35	16.32	20.43
1	12.66	18.43	19.77

With the addition of BRBs and the yielding of these braces, energy dissipation occurs along their length, accompanied by a reduction in structural displacements. To prevent the formation of plastic hinges in the columns and to limit the structural displacements, TMDs were implemented. This approach has proven effective, as reflected in the results. By adding BRBs to the truss beams, the stiffness of the beams increases, which slightly reduces the fundamental period of the structure from 1.928 to 1.925 seconds.

However, when TMDs are installed on the roof to suppress vibrations, the fundamental period increases from 1.928 to 2.17 seconds. These dampers, operating out of phase with the structural motion, reduce the structural responses. Although TMDs are typically tuned to the fundamental mode of the structure, the characteristics of the input ground motion and the site soil conditions can significantly influence the behavior of both the structure and the dampers. Furthermore, once the structure enters the nonlinear range, the tuning of the TMDs may no longer be optimal. Therefore, employing multiple tuned mass dampers and novel control strategies can enhance the effectiveness of vibration mitigation. The addition of BRBs to the structure has led to an average reduction of 9.11% in displacement responses compared to the case without BRBs. Moreover, the incorporation of TMDs resulted in improvements of 27.95% compared to the bare structure (without BRBs) and 20.69% compared to the structure equipped with BRBs.

Funding Statement

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

Sasan Mostaghimi Tehrani:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Software; Roles/Writing – original draft; Writing – review & editing.

Morteza Raissi Dehkordi:

Conceptualization; Investigation; Methodology; Project administration; Resources; Supervision; Writing – review & editing.

Elham Rajabi:

Conceptualization; Investigation; Project administration; Resources; Validation; Writing – review & editing.

کنترل ارتعاشات لرزه‌ای سازه قاب خمشی خرابایی ویژه با استفاده از مهاربندهای کمانش‌تاب و میراگرهای جرمی تنظیم‌شده

ساسان مستقیمی طهرانی^۱، مرتضی دهکردی^۲، الهام رجبی^۳

۱. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. رایانامه: sasan_mostaghimi@alumni.iust.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. رایانامه: mraissi@iust.ac.ir

۳. گروه پژوهشی تحلیل کمی و کیفی سیالات و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران. رایانامه: rajabi@tafreshu.ac.ir

چکیده

کنترل ارتعاشات سازه‌ها با استفاده از روش‌های مختلف شامل کنترل غیرفعال، نیمه‌فعال، فعال و حالت ترکیبی امکان‌پذیر است. یکی از موثرترین روش‌های کنترل غیرفعال سازه‌ها، استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم‌شده می‌باشد که در مطالعات اخیر به طور گسترده مورد توجه بوده است. در این مطالعه سازه ۱۰ طبقه قاب خمشی خرابایی ویژه، در حالت بدون وجود مهاربند کمانش‌تاب، با وجود مهاربند کمانش‌تاب و همچنین افزودن میراگر جرمی تنظیم‌شده بر روی سازه دارای مهاربند کمانش‌تاب تحت اثر نیروی زلزله، با صرف‌نظر از تأثیر ساختگاه، مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم‌شده، این میراگرها با نسبت جرمی دو درصد جرم سازه در شش نقطه بام سازه جانمایی و نصب شده‌اند. نتایج تحلیل‌های دینامیکی فزاینده عملکرد بسیار خوب میراگر جرمی و مهاربند کمانش‌تاب به صورت توأم را نشان می‌دهد. به گونه‌ای که مقدار بهبود نتایج نسبت به حالت بدون وجود مهاربند کمانش‌تاب در سازه ۲۷/۹۵ درصد می‌باشد. میزان تأثیر افزودن میراگر جرمی تنظیم‌شده به سازه در کاهش ارتعاشات سازه با حالت افزودن مهاربند کمانش‌تاب تقریباً برابر است.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۲۲

کلیدواژه‌ها:

قاب خمشی خرابایی ویژه،
مهاربند کمانش‌تاب،
میراگر جرمی تنظیم‌شده،
تحلیل دینامیکی افزایشی.

استناد: مستقیمی طهرانی ساسان، دهکردی مرتضی، رجبی الهام. کنترل ارتعاشات لرزه‌ای سازه قاب خمشی خرابایی ویژه با استفاده از مهاربندهای کمانش‌تاب و میراگرهای جرمی تنظیم‌شده. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۴؛ ۱۱(۲): ۱۷-۳۰.

<https://doi.org/10.22091/cer.2025.12392.1603>

۱- مقدمه

در میان محققین یکی از موثرترین روش‌های کنترل سازه‌ها، استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده غیرفعال می‌باشد. این میراگرها دارای جرمی در حدود ۱ تا ۵ درصد وزن کل سازه بوده، به وسیله یک فنر و میراگر به محلی از سازه، که معمولاً دارای بیشترین تغییرمکان می‌باشد، متصل می‌گردند. میراگرهای جرمی را معمولاً روی فرکانس اصلی ارتعاش سازه تنظیم می‌کنند. هنگامی که این فرکانس تحریک می‌شود، میراگر جرمی با حرکت غیرهم‌فاز خود نسبت به سازه، انرژی زلزله را جذب و تلف می‌کند. میراگر جرمی را می‌توان بسیار ساده نصب و اجرا نمود. حتی می‌توان از تجهیزات درون سازه مانند دستگاه‌های تأسیساتی به عنوان میراگر جرمی استفاده نمود. برخلاف سایر ابزارهای کنترل سازه نظیر کنترل فعال، نگهداری میراگرهای جرمی هزینه زیادی ندارد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که هنگامی می‌توان از حداکثر ظرفیت میراگرهای جرمی فعال و غیرفعال استفاده نمود که پارامترهای آن‌ها بهینه باشند. تمامی تحقیقات انجام شده در خصوص میراگر جرمی سعی در یافتن پارامترهای بهینه میراگر نظیر سختی، میرایی و گاهی جرم برای بارگذاری‌های مختلف، که به شکل‌های مختلف مدل می‌شوند، داشته است. در این مطالعات از معیارهای متفاوتی از جمله حداقل نمودن بیشینه تغییرمکان، شتاب، سرعت سازه و غیره برای پیدا کردن پارامترهای بهینه میراگر جرمی استفاده شده است. برای محاسبه پارامترهای بهینه میراگر جرمی، عمدتاً از روش‌های غیرمستقیم ریاضی، جستجوی عددی و اخیراً الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی مانند ژنتیک، ازدحام ذرات و جستجوی هم‌ساز استفاده می‌شود. مفهوم میراگر جرمی برای نخستین بار توسط فرام [۱] در سال ۱۹۰۹ به منظور کاهش ارتعاشات ناشی از امواج دریا بر بدنه کشتی مطرح گردید. در تحقیقات اولیه که بر روی میراگر جرمی انجام شده بود، تاثیر مثبت این میراگر را با فرض عدم وجود میرایی آن برای حالتی یافتند

که فرکانس بارگذاری به فرکانس میراگر جرمی بسیار نزدیک باشد. شایان ذکر است که اگر فرکانس بارگذاری با فرکانس میراگر جرمی متفاوت باشد اثربخشی میراگر جرمی به شدت کاهش می‌یابد. نخستین تجربه موفق کاربرد میراگر جرمی تنظیم‌شونده برای بارهای لرزه‌ای در سال ۱۹۷۳ توسط یائو و همکاران [۲] ارائه گردید که پاسخ مود اول دو سازه ۵ و ۱۰ طبقه را با نسبت میرایی مودی ۲ درصد برای شتاب پایه غیرثابت مورد بررسی قرار دادند. مقدس و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۱ به بررسی کنترل ارتعاشات تیر تیموشنکو زیر بار متحرک با استفاده از میراگر جرمی از روش المان محدود پرداختند. تابع هدف آنها برای بهینه یابی مقادیر پارامترهای میراگر به حداقل رساندن خیز میانه تیر بود. محبی و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۲ به بررسی اثربخشی میراگر جرمی برای کاهش پاسخ سازه‌ها با رفتار غیرخطی سازه هشت طبقه تحت نیروهای زلزله پرداختند. شن و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۲ به بررسی آزمایشگاهی میراگر آونگی تنظیم شونده با استفاده از سیستم کنترل الکترومغناطیسی چرخشی به همراه حسگرهای پایش حرکات بهره گرفتند. در این مطالعه از حرکات میراگر جهت تولید انرژی الکتریکی و کاهش ارتعاشات سازه استفاده شد. سهیلی و فرشادیانفر [۶] در سال ۲۰۱۳ با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه‌ها پارامترهای بهینه یک میراگر جرمی را که بر روی سازه چهل طبقه زیر شتاب پایه‌های کوبه و طبس بدست آوردند. سهیلی و فرشادیانفر [۷] در سال ۲۰۱۳ طی پژوهش دیگری با استفاده از الگوریتم مصنوعی کلونی زنبورها، پارامترهای بهینه میراگر جرمی را برای شش زلزله حوزه دور با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه محاسبه نمودند. آن‌ها سپس روابطی را برای پارامترهای بهینه میراگر جرمی برای خاک‌های مختلف ارائه نمودند و روابط بدست آمده را برای طراحی میراگر جرمی در دو سازه پانزده و چهل طبقه و ده زلزله حوزه دور جدید به کار بردند. میراگرهای جرمی تنظیم‌شده برای کاهش ارتعاشات میانه تیرهای پل‌ها استفاده می‌شود که اغلب برای ارتعاش در

راستای قائم به کار برده شده است. دنباس و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۶ به کاربرد میراگرهای جرمی با در نظر گرفتن مدهای ارتعاشی عمودی، عرضی و پیچشی پل‌ها پرداختند. بطهایی و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۶ از میراگرهای جرمی چندگانه در حالت بهینه در پل قوسی کالج شهر تهران تحت اثر بار زلزله بهره بردند. کارین هاس و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۷ از نرم‌افزار انسیس به منظور بررسی عددی کاهش ارتعاشات توربین بادی با استفاده از میراگر جرمی آونگی استفاده کردند. پارامترهای میراگر شامل میرایی، سختی، جرم و طول با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک بهینه‌یابی شدند. رمضانی و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۷ به بهینه‌یابی مقادیر میراگر جرمی در سازه‌های بلند پرداختند. آن‌ها [۱۲] همچنین در سال ۲۰۱۸ به ترکیب میراگر جرمی و مغناطیسی در سازه یازده طبقه تحت اثر بار جانبی زلزله و استفاده از الگوریتم منطق فازی پرداختند. الیاس و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۹ به کنترل پاسخ دینامیکی یک ساختمان بلندمرتبه با میراگرهای جرمی تنظیم‌شده چندگانه تحت بار جانبی باد پرداختند. کاوه و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۲۰ به کنترل بهینه سازه‌های بلندمرتبه با استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم‌شده به کمک الگوریتم بهینه‌سازی آشوب پرداختند. لی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۲۰ به کنترل ارتعاشات عمودی پل تحت تاثیر بارهای متمرکز متحرک با استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده پرداختند. در تعیین مقادیر بهینه پارامترهای میراگر جرمی از روش لاگرانژی تقویت‌شده استفاده شد که نسبت به روش سنتی دن‌ها توگ نیز عملکرد بهتری داشت. بای و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۲۱ به کنترل ارتعاشات تیر اویلر برنولی با استفاده از میراگر جرمی تقویت‌شده تحت تاثیر بارگذاری هارمونیک پرداختند. آن‌ها به منظور بهینه‌یابی پارامترهای میراگر از روش‌های عددی بهره گرفتند. چن و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۲۱ از میراگر جرمی تنظیم‌شده برای کنترل ارتعاشات توربین تک‌پایه بادی دریایی استفاده کردند. آن‌ها برای تنظیم پارامترهای

بهینه میراگر جرمی از الگوریتم ازدحام ماهی به همراه تحلیل مودال بهره گرفتند. ونگ و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۲۱ کنترل نیمه‌فعال ارتعاشات ناشی از راه رفتن در پل‌های پیاده‌رو را با استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شونده و لحاظ نمودن اندرکنش انسان و سازه بررسی نمودند. نتایج نشان دادند که این میراگرها بهترین عملکرد را دارند، چرا که می‌توانند خود را با تغییرات فرکانس ارتعاشی سازه به طور موثر و با تنظیم مجدد وفق دهند. آن‌ها [۱۹] همچنین در سال ۲۰۲۳ مطالعه‌ای تجربی بر روی میراگر جرمی تنظیم‌شونده غیرفعال با سختی متغیر برای کنترل ارتعاشات قائم ایجاد شده توسط انسان در پل عابر پیاده انجام دادند. حسینی لواسانی و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۲۲ از ترکیب میراگر جرمی و مغناطیسی به منظور کاهش ارتعاشات سازه ۱۵ طبقه برشی استفاده کردند. برای تنظیم ولتاژ مناسب کنترلی برای میراگر مغناطیسی از الگوریتم منطق فازی بهره گرفته شد. ژانگ و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۲۲ بررسی عددی میراگرهای جرمی چندگانه را برای کنترل ارتعاشات سازه‌هایی که موده‌های مختلف آنها فعال می‌شوند و باعث خرابی سازه می‌شوند، ارائه دادند. آن‌ها عملکرد مناسب میراگرهای چندگانه را نسبت به میراگرهای جرمی تک گزارش نمودند. خدایی [۲۲] در سال ۲۰۲۳ به بررسی پارامتری اثربخشی میراگر جرمی و مایعی تنظیم‌شده در سازه‌های بلندمرتبه زیر اثر بار باد پرداخت. در مطالعات پیشین سازه‌های متعارف، بهینه‌یابی پارامترهای میراگر جرمی مورد بررسی قرار گرفته است؛ اما در مطالعه حاضر تمرکز بر روی سازه‌های قاب خمشی خرابی ویژه و امکان نصب آسان مهاربندهای کم‌انرژی تاب بر روی این سازه‌ها، تاثیر میراگرهای جرمی تنظیم‌شده در کاهش ارتعاشات و ترکیب آن با مهاربندهای کم‌انرژی تاب و همچنین عملکرد همزمان آنها است. میراگر جرمی تنظیم‌شده در حالت بهینه، در زمان اعمال بارهای لرزه‌ای در فاز مخالف حرکت سازه شروع به ارتعاش نموده و پاسخ‌های آن را کاهش می‌دهد. بررسی سهم تاثیر میراگر

طراحی و ارائه شده است. پلان این سازه متقارن بوده و دارای ابعاد $45/72$ متر در $45/72$ متر می‌باشد و ارتفاع آن برابر $39/62$ متر است. این سازه دارای پنج دهانه $9/144$ متری می‌باشد که تمامی دهانه‌ها در عرض و ارتفاع دارای اعضای خرابایی می‌باشند. سقف سازه‌ها کامپوزیت و مصالح ستون‌ها فولاد با مقاومت 345 مگاپاسکال بوده و ستون‌ها به شکل پروفیل‌های H شکل می‌باشند. در تراز زیرزمین، اطراف سازه با وجود دیوارهای حائل و خاک اطراف مقید فرض شده است. دوره تناوب سازه قاب خمشی خرابایی ویژه بدون مهاربند کماتش‌تاب برابر $1/925$ ثانیه و دوره تناوب سازه قاب خمشی خرابایی ویژه با مهاربند کماتش‌تاب برابر $2/1$ ثانیه می‌باشد [۲۳]. مصالح مهاربندهای کماتش‌تاب همانند ستون‌ها بوده و دارای 345 مگاپاسکال مقاومت حد تسلیم و 200 گیگاپاسکال ضریب کشسانی می‌باشد. همچنین طول مهاربندها برابر $2/718$ متر است. درصد مشارکت جرمی برای پنج مود اول سازه به ترتیب از مود اول تا پنجم برابر با 73 ، 13 ، $4/5$ ، $2/6$ و $1/4$ درصد می‌باشد. شکل سازه‌های ذکر شده در شکل ۱ نشان داده شده است. رفتار فولاد در نرم‌افزار با استفاده از uniaxialMaterial Steel02 تعریف شده است. منحنی رفتار ماده در شکل ۲ نشان داده شده است. المان‌های تیر و ستون از نوع nonlinearBeamColumn که غیرخطی می‌باشد، تعریف شده است. المان تیر ستون غیرخطی توزیع گسترده‌ی پلاستیسیته در طول المان را در نظر می‌گیرد. مقطع تیرها و ستون‌ها با استفاده از دستور section fiber ایجاد شده است. به منظور در نظر گرفتن اثر P-Delta از دستور تبدیل مختصات PDelta geomTransf استفاده شده است. جرم لرزه‌ای طبقات مختلف سازه در جدول ۱ ارائه شده است.

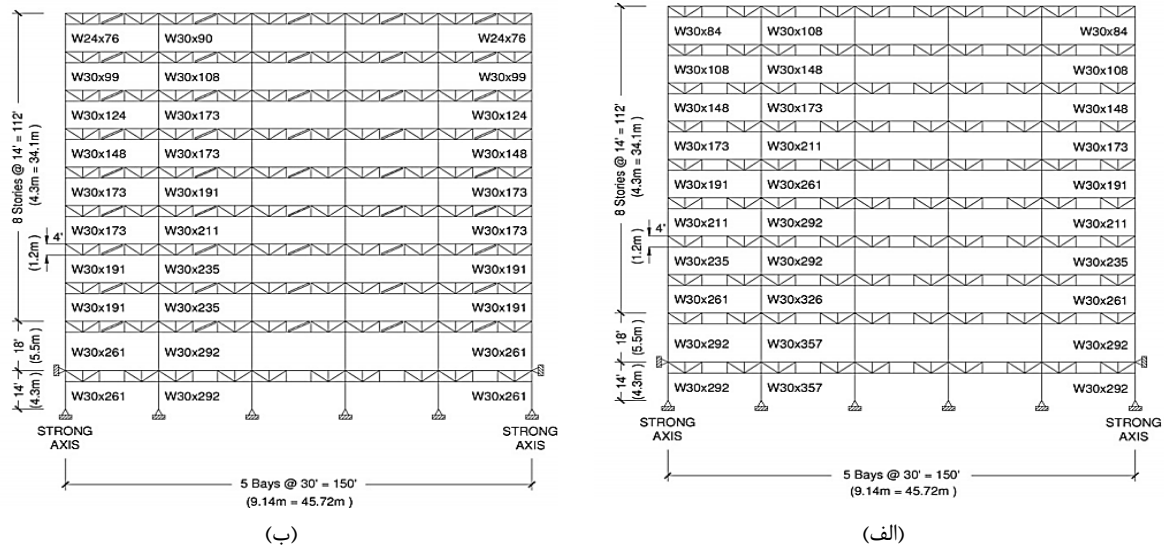
جرمی در کاهش ارتعاشات سازه در حالتی که مهاربند کماتش‌تاب نیز به عنوان جاذب انرژی عمل می‌کند حائز اهمیت می‌باشد که یکی از اهداف این مطالعه است. همچنین زمانی که سازه وارد ناحیه غیرخطی می‌شود سختی آن تغییر کرده و میراگر جرمی از حالت تنظیم خارج می‌گردد. لذا افزودن مهاربند کماتش‌تاب پتانسیل افزایش عملکرد میراگر جرمی را در بیشینه شتاب‌های بالاتر دارد. در نتیجه در این مقاله به بررسی تاثیر میراگر جرمی تنظیم‌شده به همراه مهاربند کماتش‌تاب در کاهش ارتعاشات و تغییر مکان بام سازه ده طبقه با سیستم قاب خمشی خرابایی ویژه که تحت اثر هفت زلزله با بیشینه شتابی معادل $0.1g$ تا $1.0g$ با گام افزایشی $0.1g$ قرار دارد، پرداخته شده است. در این مطالعه ابتدا سازه ده طبقه قاب خمشی خرابایی ویژه بدون وجود مهاربند کماتش‌تاب در ناحیه ویژه تیرهای خرابایی تحت اثر زلزله‌های اعمالی قرار می‌گیرد و در ادامه افزودن مهاربند کماتش‌تاب به صورت قطری در داخل ناحیه ویژه و میراگرهای جرمی چندگانه در بام سازه جهت کاهش ارتعاشات لرزه‌ای مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- سازه‌های مطالعه شده

به منظور مدل‌سازی سازه‌ها و بررسی اهداف مقاله از سازه‌های مطالعات پکجان^۱ و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۰۹ بهره گرفته شده است. مدل آن‌ها یک سازه ده طبقه (نه طبقه به همراه یک طبقه زیرزمین) می‌باشد که از اطراف کاملاً محصور شده به خاک زیر پی است. سازه آن‌ها قاب خمشی خرابایی ویژه با و بدون مهاربند کماتش‌تاب است که در نرم‌افزار سپ پیاده‌سازی شده بود. سازه قاب خمشی خرابایی ویژه استفاده شده در مطالعات پکجان و همکاران یک سازه مرجع می‌باشد که پیشتر توسط چائو و گوئل^۲

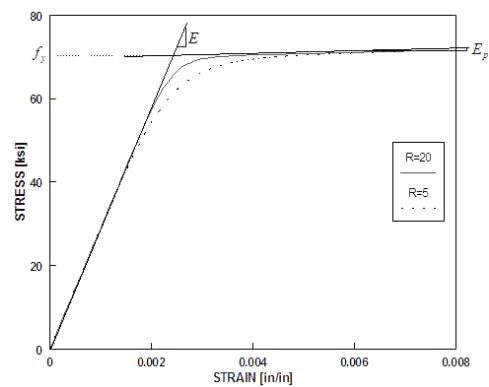
² Chao and Goel

¹ Pekcan



شکل ۱. سازه ده طبقه (الف) بدون و (ب) با مهاربند کمانش تاب مطالعات پکجان و همکاران [۲۳]

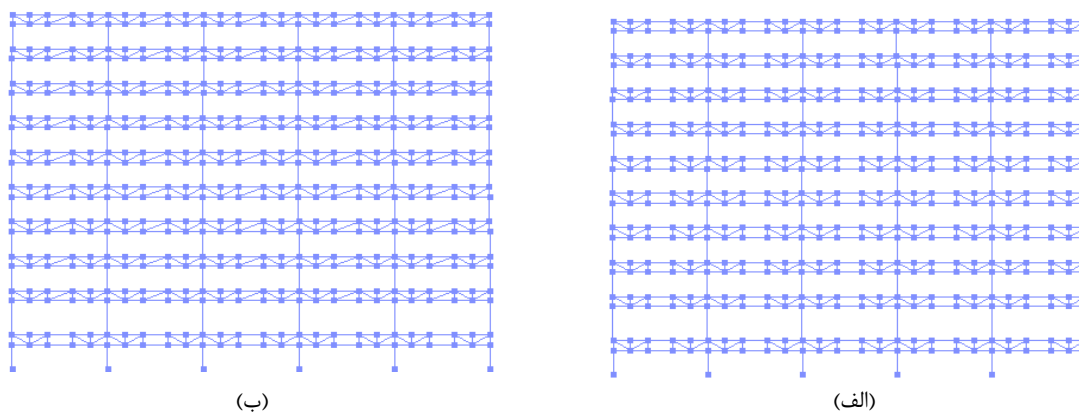
در شکل ۳ مدل‌های پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار OpenSEES نشان داده شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل‌های مطالعه شده، علاوه بر مقایسه زمان تناوب اصلی نوسان سازه‌ها طبق جدول ۲ با سازه‌های مرجع، منحنی پوش‌اور سازه‌های مدل‌شده نیز با سازه‌های اصلی و مرجع مطابق شکل ۴ مقایسه شده است. با توجه به مقادیر جدول ۲ خطای مدل‌سازی کمتر از ۰/۵ درصد می‌باشد که دقت بالای مدل‌سازی را نشان می‌دهد.



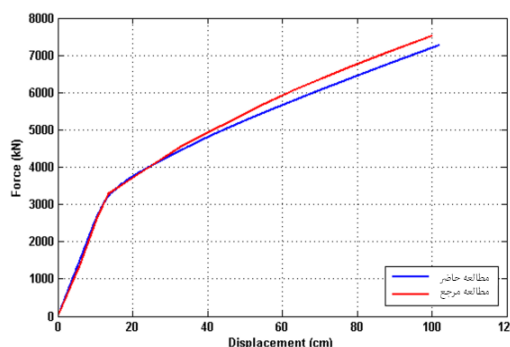
شکل ۲. منحنی رفتار مصالح Steel02 [۲۴]

جدول ۱. جرم لرزه‌ای طبقات مختلف سازه

طبقه	جرم لرزه‌ای (kN s ² /m)
تراز زمین	۹۶۳
اول	۱۰۰۷
دوم	۹۸۸
سوم	۹۸۸
چهارم	۹۸۸
پنجم	۹۸۸
ششم	۹۸۸
هفتم	۹۸۸
هشتم	۹۸۸
نهم	۱۰۶۸



شکل ۳. سازه قاب خمشی خرابایی ویژه (الف) بدون و (ب) با مهاربند کماتش تاب مدل سازی شده در نرم افزار اپنسیس



شکل ۴ مقایسه نمودار پوش آور مطالعه حاضر و مقاله مرجع [۲۳]

جدول ۲. مقایسه دوره تناوب اصلی نوسان سازه‌های پیاده سازی شده در نرم افزار اپنسیس و سازه‌های مرجع

مدل	مدل مرجع	مدل ساخته شده	خطا %
بدون مهاربند	۱/۹۲۵ ثانیه	۱/۹۲۸ ثانیه	۰/۱۵
با مهاربند	۲/۱ ثانیه	۲/۱۱ ثانیه	۰/۴۷

۳- پارامترهای بهینه فرکانس و میرایی میراگرها

نسبت جرمی میراگر جرمی تنظیم شونده ۲ درصد جرم سازه می باشد و برای فرکانس و درصد میرایی میراگر جرمی از روابط ۱ و ۲ ارائه شده توسط پاستیا^۳ و لوکا^۴ استفاده شده است [۲۵]. شایان ذکر است که در صورت بهره گیری از روش های بهینه یابی می توان درصد جرمی مناسب میراگرهای جرمی، میرایی میراگرها و سختی آنها را به صورت دقیق تعیین نمود که تابع هدف این روابط کاهش تغییرمکان سازه و به تبع آن کاهش محسوس برش پایه سازه می باشد. در روابط استفاده شده در این مطالعه

تابع هدف کاهش مقادیر تغییرمکان محل نصب میراگر می باشد.

$$f_{TMD} = \frac{f_1}{1 + \mu} \quad (1)$$

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \quad (2)$$

f_1 و f_{TMD} به ترتیب فرکانس میراگر جرمی و سازه می باشد. μ نسبت جرمی و ξ_{opt} درصد میرایی بهینه میراگر جرمی است. جرم کل سازه برابر ۹۹۵۴۰ و جرم میراگر برابر ۱۹۹۰/۸ کیلوگرم است که در شش نقطه و بر روی انتهای ستون های سازه در بام نصب گردیده اند. فرکانس سازه برابر ۰/۴۷۳۹ هرتز و فرکانس میراگر جرمی

⁴ Luca

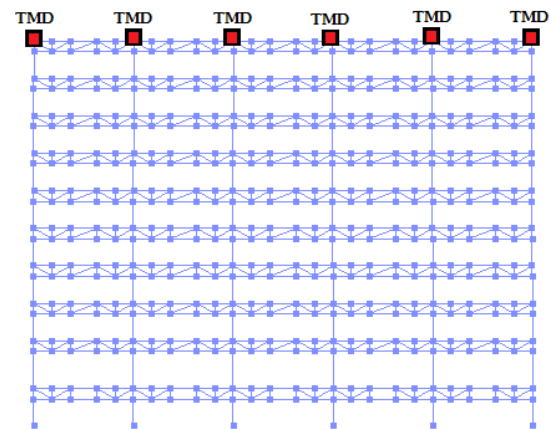
³ Pastia

زلزله‌های انتخاب شده برای اعمال نیروی زلزله با استفاده از دستورالعمل FEMA P695 [۲۶] انتخاب شده است که در جدول ۳ معرفی شده‌اند. هفت زلزله اعمال شده به سازه، با بیشینه شتاب‌های $0.1g$ تا $1.0g$ با گام افزایشی $0.1g$ می‌باشند. طیف پاسخ شتاب سیستم یک درجه آزادی زلزله‌های اعمال شده به سازه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

۵- تحلیل‌های دینامیکی افزایشی

تحلیل دینامیکی فزاینده^۵، یک روش تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها و براساس عملکرد می‌باشد که رفتار سازه را در طیف وسیعی از شدت‌های مختلف زلزله بیان می‌کند. این روش با توجه به اینکه رفتار مصالح را غیرخطی در نظر می‌گیرد و نیز ماهیت دینامیکی دارد، در مقایسه با روش‌های استاتیکی مانند تحلیل استاتیکی خطی بار افزون (پوش‌اور) و روش‌های خطی مانند تحلیل دینامیکی طیفی دقیق‌ترین روش در تخمین رفتار سازه‌ها است.

0.4646 هرتز می‌باشد. درصد میرایی بهینه میراگر نیز $8/4$ درصد است. به منظور مدل‌سازی سختی و میرایی میراگر جرمی به ترتیب از مصالح الاستیک و ویسکوز در نرم‌افزار OpenSEES استفاده شده است. محل نصب میراگرهای جرمی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. محل نصب و چیدمان میراگرهای جرمی تنظیم‌شده

۴- شتابنگاشت‌های استفاده شده

جدول ۳. زلزله‌های اعمال‌شده به سازه‌ها

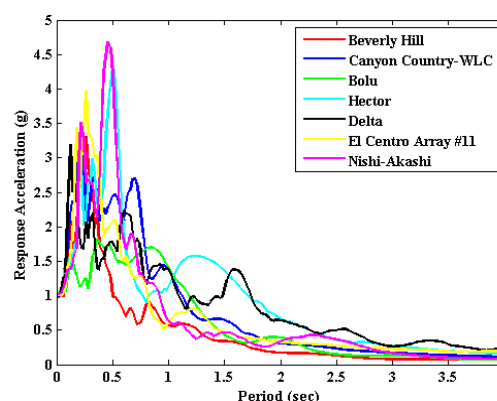
شماره	زلزله	ایستگاه	بزرگا	سال	بیشینه شتاب (g)	دوره تناوب (s)
۱	Northridge	Beverly Hill	۶/۷	۱۹۹۴	۰/۵۲	۰/۳۶
۲	Northridge	Canyon Country-WLC	۶/۷	۱۹۹۴	۰/۴۸	۰/۳۸
۳	Duzce, turkey	Bolu	۷/۱	۱۹۹۹	۰/۸۲	۰/۳۶
۴	Hector Mine	Hector	۷/۱	۱۹۹۹	۰/۳۴	۰/۵۱
۵	Imperial Valley	Delta	۶/۵	۱۹۷۹	۰/۳۵	۰/۱۳
۶	Imperial Valley	El Centro Array #11	۶/۵	۱۹۷۹	۰/۳۸	۰/۳۵
۷	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	۶/۹	۱۹۹۵	۰/۵۱	۰/۴۸

نشان داده شده است. بیشترین پاسخ‌ها برای سازه بدون مهاربند کمانش‌تاب بوده است؛ که با افزودن مهاربند کمانش‌تاب تغییرمکان‌های بام سازه کاهش یافته است. با افزودن میراگر جرمی تنظیم‌شده در شش نقطه از بام سازه و به صورت چندگانه نتایج پاسخ تغییرمکان بام سازه نسبت

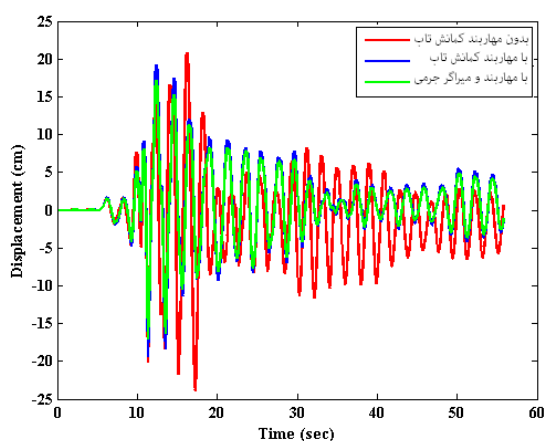
در این مقاله از هفت زلزله با بیشینه شتاب‌های $0.1g$ تا $1.0g$ با گام افزایشی $0.1g$ برای تعیین عملکرد سیستم کنترلی مجهز به مهاربند کمانش‌تاب و میراگر جرمی تنظیم شده در حالت بهینه استفاده شده است. به عنوان نمونه پاسخ تغییرمکان بام سازه تحت اثر زلزله Duzce با بیشینه شتاب‌هایی معادل 0.1 ، 0.5 و $1.0g$ به ترتیب در شکل ۷

⁵ Incremental Dynamic Analysis (IDA)

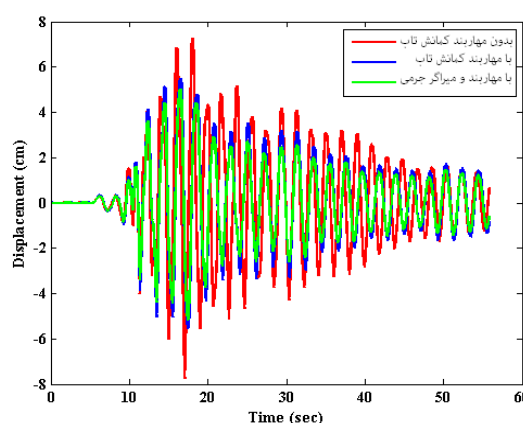
به هر دو حالت قبلی (با و بدون وجود مهاربند کماتش تاب در سازه) کاهش بیشتری داشته است.



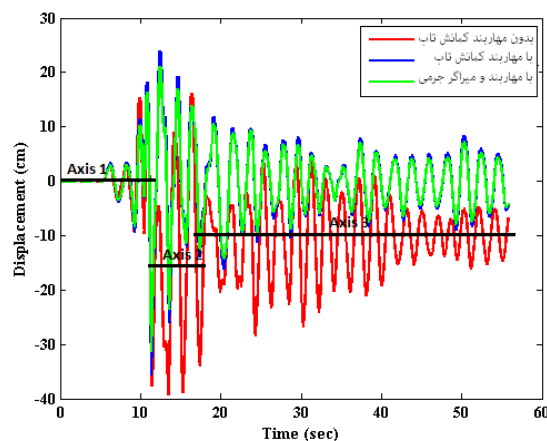
شکل ۶. طیف پاسخ شتاب زلزله‌های انتخابی



(ب)



(الف)



(پ)

شکل ۷. تغییرمکان بام سازه تحت زلزله دوزسو با شتاب (الف) ۰/۱، (ب) ۰/۵ و (پ) ۱/۰ g

پلاستیک حول دو محور جدید دیگر ارتعاش نموده است. بیشینه تغییرمکان بام سازه و متوسط آن برای سازه بدون مهاربند کماتش تاب، با مهاربند کماتش تاب و سازه به همراه مهاربند کماتش تاب و میراگر جرمی به ترتیب در جدول‌های

زمانی که در سازه مفاصل پلاستیک تشکیل می‌گردد، سازه به ناحیه غیرخطی وارد شده و حول این مفاصل پلاستیک شروع به ارتعاش می‌نماید. در شکل ۷- پ سازه بدون مهاربند کماتش تاب بعد از تسلیم و تشکیل مفاصل

۴ تا ۶ ارائه شده است. متوسط مقادیر بهبود بیشینه تغییرمکان بام سازه در سیستم‌های کنترلی مختلف در جدول ۷ نشان داده شده است. نمودار بیشینه

جدول ۴. بیشینه تغییرمکان بام سازه بدون مهاربند کماتش‌تاب

Maximum displacement (m)								PGA(g)
Average	EQ 7	EQ 6	EQ 5	EQ 4	EQ 3	EQ 2	EQ 1	
۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۱
۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۰۶	۰/۲
۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۱۶	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۰	۰/۱۴	۰/۰۹	۰/۳
۰/۲۱	۰/۱۷	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۳۱	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۱۲	۰/۴
۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۲۴	۰/۲۰	۰/۱۵	۰/۵
۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۶	۰/۴۲	۰/۳۳	۰/۲۶	۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۶
۰/۳۱	۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۳۷	۰/۳۷	۰/۲۹	۰/۲۶	۰/۲۲	۰/۷
۰/۴۱	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۷۴	۰/۴۲	۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۲۵	۰/۸
۰/۴۹	۰/۴۶	۰/۴۹	۰/۹۲	۰/۴۷	۰/۳۶	۰/۴۲	۰/۲۸	۰/۹
۰/۵۶	۰/۵۰	۰/۵۹	۱/۰۹	۰/۵۱	۰/۳۹	۰/۵۲	۰/۳۲	۱/۰

جدول ۵. بیشینه تغییرمکان بام سازه مجهز به مهاربند کماتش‌تاب

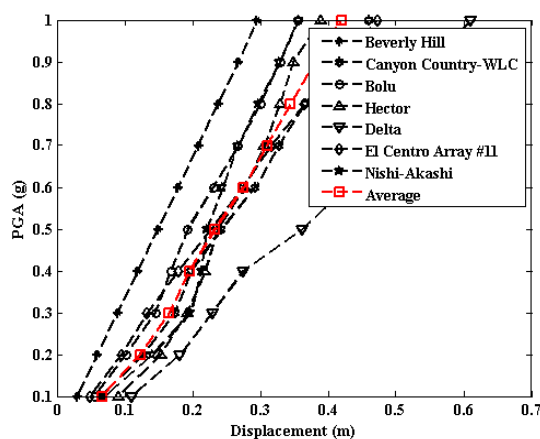
Maximum displacement (m)								PGA(g)
Average	EQ 7	EQ 6	EQ 5	EQ 4	EQ 3	EQ 2	EQ 1	
۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۱
۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۰۶	۰/۲
۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۱۳	۰/۲۳	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۰۹	۰/۳
۰/۲۰	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۲۸	۰/۲۲	۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۱۲	۰/۴
۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۳۶	۰/۲۴	۰/۱۹	۰/۲۴	۰/۱۵	۰/۵
۰/۲۸	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۴۳	۰/۲۸	۰/۲۳	۰/۲۹	۰/۱۸	۰/۶
۰/۳۱	۰/۲۷	۰/۳۲	۰/۴۸	۰/۳۱	۰/۲۷	۰/۳۳	۰/۲۱	۰/۷
۰/۳۴	۰/۳۰	۰/۳۷	۰/۵۲	۰/۳۳	۰/۳۰	۰/۳۷	۰/۲۴	۰/۸
۰/۳۸	۰/۳۳	۰/۴۲	۰/۵۶	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۴۱	۰/۲۷	۰/۹
۰/۴۲	۰/۳۶	۰/۴۷	۰/۶۱	۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۴۶	۰/۳۰	۱/۰

جدول ۶. بیشینه تغییرمکان بام سازه مجهز به مهاربند کماتش‌تاب و میراگر جرمی تنظیم‌شده

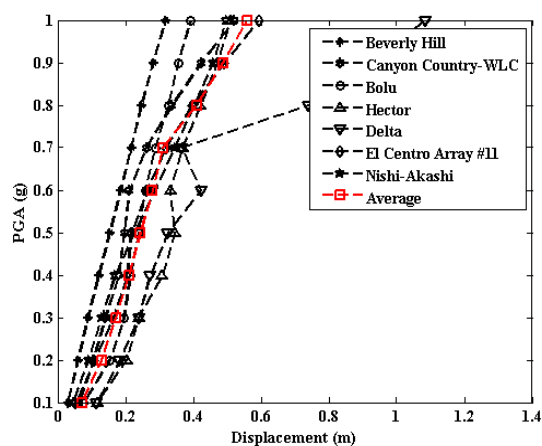
Maximum displacement (m)								PGA(g)
Average	EQ 7	EQ 6	EQ 5	EQ 4	EQ 3	EQ 2	EQ 1	
۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۱
۰/۱۰	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۲
۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۲۰	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۰۸	۰/۳
۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۲۴	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۱۰	۰/۴
۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۲۰	۰/۳۲	۰/۲۱	۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۱۳	۰/۵
۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۳۹	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۱۶	۰/۶
۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۹	۰/۴۳	۰/۲۷	۰/۲۴	۰/۲۹	۰/۱۸	۰/۷
۰/۲۸	۰/۲۶	۰/۳۳	۰/۴۸	۰/۲۹	۰/۲۶	۰/۳۲	۰/۲۰	۰/۸
۰/۳۰	۰/۲۸	۰/۳۸	۰/۵۱	۰/۳۲	۰/۲۹	۰/۳۶	۰/۲۳	۰/۹
۰/۳۴	۰/۳۰	۰/۴۳	۰/۵۶	۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۴۰	۰/۲۶	۱/۰

جدول ۷. متوسط مقادیر بهبود بیشینه تغییر مکان بام سازه

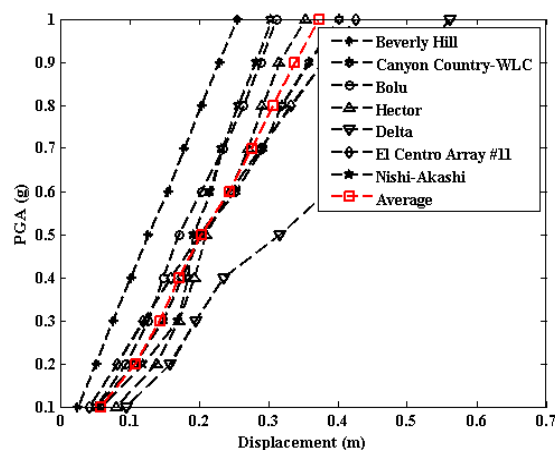
With BRB+TMD/ With BRB (%)	With BRB+TMD/Without BRB (%)	With BRB/Without BRB (%)	PGA(g)
۲۱/۴۴	۲۷/۰۶	۷/۱۵	۰/۱
۲۰/۹۶	۲۴/۸۷	۴/۹۵	۰/۲
۲۱/۸۷	۲۴/۲۰	۳/۱۰	۰/۳
۲۱/۱۶	۲۶/۷۰	۷/۰۲	۰/۴
۲۱/۶۳	۲۴/۹۴	۴/۲۲	۰/۵
۲۰/۳۶	۲۱/۸۳	۱/۸۴	۰/۶
۱۹/۷۲	۱۹/۷۶	۰/۰۵	۰/۷
۲۰/۰۱	۳۲/۸۴	۱۶/۰۴	۰/۸
۲۰/۰۰	۳۷/۴۴	۲۱/۸۰	۰/۹
۱۹/۹۰	۳۹/۹۵	۲۵/۰۳	۱/۰



(ب)



(الف)



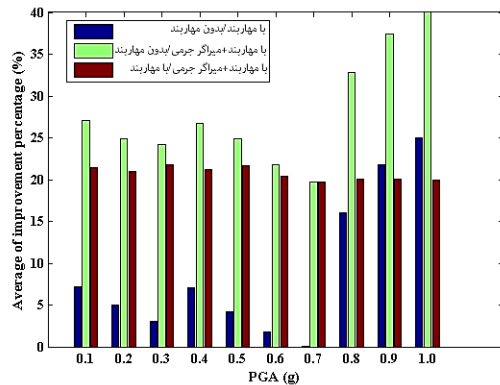
(پ)

شکل ۸. بیشینه تغییر مکان بام سازه (الف) بدون وجود مهاربند کمانش تاب، (ب) با وجود مهاربند کمانش تاب و (پ) با مهاربند کمانش تاب و میراگر جرمی تنظیم شده

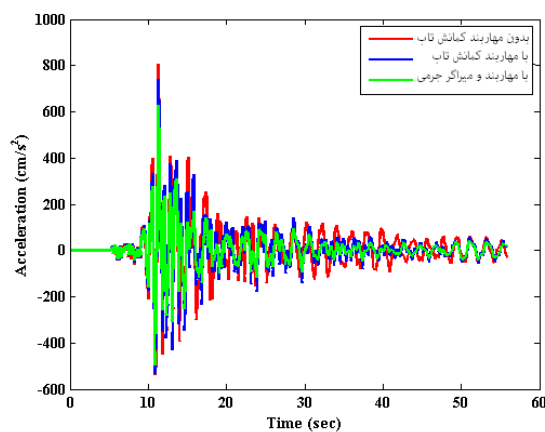
مناسب سیستم کنترلی میراگر جرمی و مهاربند کمانش تاب در کاهش شتاب بام و برش پایه سازه مشهود می‌باشد. تشکیل مفصل‌های پلاستیک در سازه در حالتی که مهاربند کمانش تاب در سازه وجود ندارد متمرکز بر روی تیرهای

در شکل ۹، نمودار میله‌ای مقادیر بهبود بیشینه تغییر مکان بام سازه‌ها نسبت به یکدیگر نشان داده شده است.

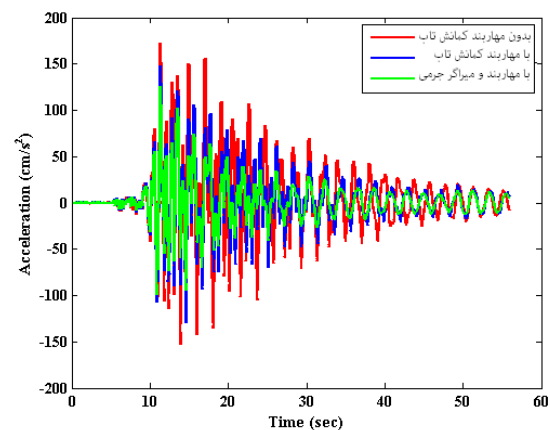
پاسخ شتاب بام سازه تحت اثر شدت‌های مختلف زلزله دوزسو نیز در شکل ۱۰ نشان داده شده است. عملکرد



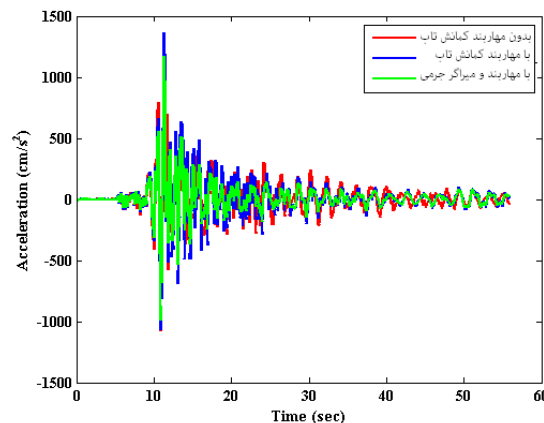
شکل ۹. مقادیر بهبود پاسخ بیشینه تغییر مکان بام سازه‌ها



(ب)



(الف)



(پ)

شکل ۱۰. شتاب بام سازه تحت زلزله دوزسو با شتاب (الف) ۰/۱، (ب) ۰/۵ و (پ) ۱/۰ g

سازه ده طبقه قاب خمشی خرابایی ویژه زیر اثر بارگذاری زلزله مطالعه شده قرار گرفته است.

سازه مورد نظر در حالت بدون وجود مهاریند کمانش تاب، با وجود مهاریند کمانش تاب و سازه مجهز به مهاریند کمانش تاب و میراگر جرمی تنظیم شده در حالت

خرپایی سازه می‌باشد که در شکل ۱۱-الف نشان داده شده است.

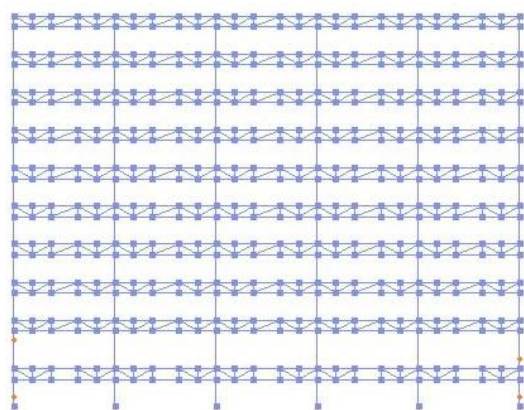
با توجه به اینکه ناحیه میانی تیرهای خرابایی طبقات نسبت به نواحی کناری رفتاری نرم‌تر و سختی کمتری دارند لذا تشکیل مفاصل پلاستیک در این نواحی متمرکز می‌گردد و در حالتی که مهاریند کمانش تاب به تیرهای خرابایی اضافه می‌گردد سختی ناحیه میانی تیرها نیز افزایش یافته و در نتیجه تیرهای خرابایی رفتاری صلب دارند و مفاصل پلاستیک به ستونهای طبقات اول و دوم منتقل می‌گردد که می‌توان در شکل ۱۱-ب مشاهده نمود.

۶- نتیجه‌گیری

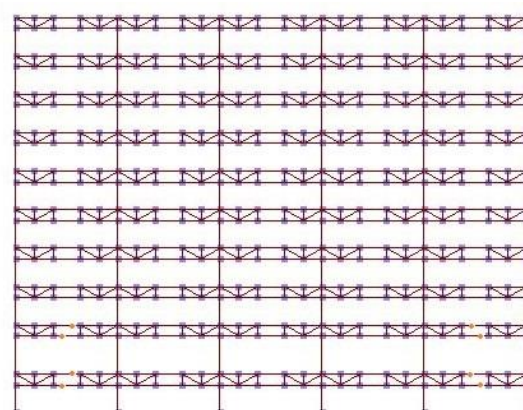
کنترل ارتعاشات سازه‌ها یکی از زمینه‌های مهم مهندسی عمران می‌باشد که در سال‌های اخیر توجه محققین به این زمینه معطوف شده است. در این مطالعه

استفاده از سیستم‌های کنترلی مختلف مورد بررسی، در جدول‌های ۸ و ۹ ارائه شده است.

بهینه، در نرم‌افزار OpenSEES مدل‌سازی شده است که متوسط درصد بهبود حداکثر شتاب بام و برش پایه سازه با



(ب)



(الف)

شکل ۱۱. تشکیل مفاصل پلاستیک در حالت (الف) بدون و (ب) با وجود مهاربند کماتش‌تاب در سازه

جدول ۸. متوسط مقادیر بهبود حداکثر شتاب بام سازه تحت زلزله‌های اعمال شده

With BRB+TMD/ With BRB (%)	With BRB+TMD/Without BRB (%)	With BRB/Without BRB (%)	PGA(g)
۲۳/۶۹	۴۲/۴۶	۲۴/۳۶	۰/۱
۲۲/۳۱	۳۸/۰۴	۲۰/۰۴	۰/۲
۲۳/۲۶	۳۲/۲۰	۱۲/۶۶	۰/۳
۲۳/۲۴	۲۷/۵۶	۱۰/۴۰	۰/۴
۲۲/۰۴	۲۳/۴۳	۱۰/۳۰	۰/۵
۲۰/۹۰	۱۹/۸۸	۱۰/۷۰	۰/۶
۲۲/۱۵	۱۸/۲۵	۱۲/۶۹	۰/۷
۲۱/۷۸	۱۷/۱۲	۱۲/۶۴	۰/۸
۲۱/۸۲	۱۷/۴۰	۱۲/۴۴	۰/۹
۲۰/۹۶	۱۹/۰۶	۱۳/۹۳	۱/۰

جدول ۹. متوسط مقادیر بهبود حداکثر برش پایه سازه تحت اثر زلزله‌های اعمال شده

With BRB+TMD/ With BRB (%)	With BRB+TMD/Without BRB (%)	With BRB/Without BRB (%)	PGA(g)
۲۲/۷۹	۴۱/۲۶	۲۳/۳۷	۰/۱
۲۱/۳۱	۳۷/۴۰	۲۰/۰۷	۰/۲
۲۱/۲۵	۳۱/۱۲	۱۱/۷۸	۰/۳
۲۲/۲۳	۲۶/۵۶	۱۰/۳۲	۰/۴
۲۱/۸۸	۲۲/۳۳	۱۰/۲۰	۰/۵
۱۹/۴۵	۱۸/۷۷	۱۰/۱۲	۰/۶
۲۱/۲۱	۱۷/۲۱	۱۱/۶۲	۰/۷
۲۰/۶۷	۱۶/۱۲	۱۱/۶۷	۰/۸
۲۰/۴۳	۱۶/۳۲	۱۱/۳۵	۰/۹
۱۹/۷۷	۱۸/۴۳	۱۲/۶۶	۱/۰

شده است. براساس نتایج حاصل شده از تحلیل، سازه بدون حضور مهاربند کماتش‌تاب با افزایش بیشینه شتاب‌های

تحلیل‌های دینامیکی افزایشی با هفت زلزله و با بیشینه شتاب‌های ۰/۱ تا ۱/۰ g با گام افزایشی ۰/۱g انجام

اعمالی، وارد ناحیه غیرخطی شده و مفاصل پلاستیک در سازه تشکیل می‌گردد که باعث ارتعاش سازه حول محورهای جدید شده است و بعد از اتمام بارگذاری زلزله نیز تغییر مکان‌های ماندگار در سازه مشهود می‌باشد. با توجه به اینکه قاب خمشی خرابایی ویژه دارای ناحیه ویژه در بخش میانی تیرها می‌باشد که نقش فیوز را در سیستم مذکور دارد، عمده تغییر شکل‌های غیرخطی در این نواحی متمرکز می‌گردد و مفاصل پلاستیک در بخش میانی تیرهای خرابایی شکل گرفته و جذب و مستهلک نمودن انرژی ورودی از طریق این مفاصل پلاستیک انجام می‌گیرد. در این مطالعه با افزودن مهارندهای کمانش‌تاب و تسلیم مهارندها، استهلاک انرژی در طول این مهارندها و البته کاهش تغییر مکان‌ها مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه به منظور جلوگیری از تشکیل مفصل پلاستیک در ستون‌ها از میراگرهای جرمی تنظیم‌شده در سازه استفاده شده است تا از افزایش جابجایی سازه جلوگیری نماید؛ که این نگرش بصورت کلی در نتایج مشهود می‌باشد. با افزودن مهارندهای کمانش‌تاب به تیرهای خرابایی، سختی تیرها افزایش یافته در نتیجه دوره تناوب مود اول سازه از ۱/۹۲۸

به ۱/۹۲۵ می‌رسد. با افزودن میراگر جرمی تنظیم‌شده به سازه و نصب در بام سازه جهت کاهش ارتعاشات دوره تناوب مود اول سازه از ۱/۹۲۸ به ۲/۱۷ ثانیه افزایش داشته است که با حرکت غیرهم‌فاز با حرکت سازه موجب کاهش پاسخ‌های سازه شده است. با اینکه عملکرد بهینه میراگرهای جرمی در سازه با مود اول سازه تنظیم می‌گردد اما زلزله‌های اعمالی به سازه و نوع خاک ساختگاه، رفتار سازه و میراگرها را تحت تاثیر خود قرار داده و ممکن است با ورود سازه به ناحیه غیرخطی از حالت تنظیم خارج گردد. بدین منظور میراگرهای جرمی چندگانه و راهکارهای نوین در راستای نیل به اهداف کنترل ارتعاشات مؤثر خواهد بود. با افزودن مهاربند کمانش‌تاب به سازه و اعمال زلزله‌ها به آن، پاسخ تغییر مکان‌های سازه کاهش داشته است که به طور متوسط ۹/۱۱ درصد نسبت به حالت بدون وجود مهاربند کمانش‌تاب بهبود داشته است. با افزودن میراگر جرمی تنظیم‌شده به سازه مقادیر بهبود پاسخ‌ها نسبت به حالت بدون وجود مهاربند کمانش‌تاب در سازه برابر ۲۷/۹۵ درصد و نسبت به حالت وجود مهاربند کمانش‌تاب در سازه برابر ۲۰/۶۹ درصد می‌باشد.

References

- [1] Frahm H, inventor. Device for damping vibrations of bodies. United States patent US 989,958. 1911 Apr 18.
- [2] Wirsching PH, Yao JT. Safety design concepts for seismic structures. Computers & structures. 1973 Jul 1;3(4):809-26. doi:10.1016/0045-7949(73)90060-6
- [3] Moghaddas M, Esmailzadeh E, Sedaghati R, Khosravi P. Vibration control of Timoshenko beam traversed by moving vehicle using optimized tuned mass damper. Journal of Vibration and Control. 2012 May;18(6):757-73. doi:10.1177/1077546311404267
- [4] Dong RG. Vibration-absorber effect under seismic excitation. Journal of the Structural Division. 1976 Oct;102(10):2021-31. doi:10.1061/JSDEAG.0004457
- [5] Shen WA, Zhu S, Xu YL. An experimental study on self-powered vibration control and monitoring system using electromagnetic TMD and wireless sensors. Sensors and Actuators A: Physical. 2012 Jun 1;180:166-76. doi:10.1016/j.sna.2012.04.011
- [6] Farshidianfar A, Soheili S. Ant colony optimization of tuned mass dampers for earthquake oscillations of high-rise structures including soil-structure interaction. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2013 Aug 1;51:14-22. doi:10.1016/j.soildyn.2013.04.002
- [7] Farshidianfar A, Soheili S. ABC optimization of TMD parameters for tall buildings with soil structure interaction. Interact Multiscale Mech. 2013 Dec 12;6(4):339-56. doi:10.12989/imm.2013.6.4.377
- [8] Debnath N, Deb SK, Dutta A. Multi-modal vibration control of truss bridges with tuned mass dampers under general loading. Journal of Vibration and Control. 2016 Dec;22(20):4121-40. doi:10.1177/1077546315571172
- [9] Bathaei A, Ramezani M, Ghorbani TS. Seismic Vibration Control of College Bridge Using Genetic Algorithm and Multiple Tuned Mass Dampers. doi:10.7508/cej.2017.02.008

- [10] Colherinhas GB, Shzu MA, Avila SM, de Moraes MV. Wind tower vibration controlled by a pendulum TMD using genetic optimization: beam modelling. *Procedia Engineering*. 2017 Jan 1;199:1623-8. **doi:10.1016/j.proeng.2017.09.080**
- [11] Ramezani M, Bathaei A, Ghorbani-Tanha AK. Application of artificial neural networks in optimal tuning of tuned mass dampers implemented in high-rise buildings subjected to wind load. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2018 Oct;17(4):903-15. **doi:10.1007/s11803-018-0483-4**
- [12] Bathaei A, Zahrai SM, Ramezani M. Semi-active seismic control of an 11-DOF building model with TMD+MR damper using type-1 and-2 fuzzy algorithms. *Journal of vibration and control*. 2018 Jul;24(13):2938-53. **doi:10.1177/1077546317696369**
- [13] Elias S, Matsagar V, Datta TK. Dynamic response control of a wind-excited tall building with distributed multiple tuned mass dampers. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2019 Jun 6;19(06):1950059. **doi:10.1142/S0219455419500597**
- [14] Kaveh A, Javadi SM, Moghanni RM. Optimal structural control of tall buildings using tuned mass dampers via chaotic optimization algorithm. In *Structures 2020 Dec 1* (Vol. 28, pp. 2704-2713). Elsevier. **doi:10.1016/j.istruc.2020.11.002**
- [15] Li J, Zhang H, Chen S, Zhu D. Optimization and sensitivity of TMD parameters for mitigating bridge maximum vibration response under moving forces. In *Structures 2020 Dec 1* (Vol. 28, pp. 512-520). Elsevier. **doi:10.1016/j.istruc.2020.08.065**
- [16] Bai X, Liang Q, Huo L. Vibration control of beam-model using tuned inerter enhanced TMD. *Journal of Sound and Vibration*. 2021 Oct 13;510:116304. **doi:10.1016/j.jsv.2021.116304**
- [17] Chen Y, Jin X, Luo M, Cheng P, Wang S. Vibration reduction methods of large-scale wind turbines based on system-TMD coupled algorithm. *Ocean Engineering*. 2021 Apr 15;226:108832. **doi:10.1016/j.oceaneng.2021.108832**
- [18] Wang L, Nagarajaiah S, Shi W, Zhou Y. Semi-active control of walking-induced vibrations in bridges using adaptive tuned mass damper considering human-structure-interaction. *Engineering Structures*. 2021 Oct 1;244:112743. **doi:10.1016/j.engstruct.2021.112743**
- [19] Wang L, Nagarajaiah S, Zhou Y, Shi W. Experimental study on adaptive-passive tuned mass damper with variable stiffness for vertical human-induced vibration control. *Engineering Structures*. 2023 Apr 1;280:115714. **doi:10.1016/j.engstruct.2023.115714**
- [20] Lavassani SH, Shangapour S, Homami P, Gharehbaghi V, Farsangi EN, Yang TY. An innovative methodology for hybrid vibration control (MR+ TMD) of buildings under seismic excitations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2022 Apr 1;155:107175. **doi:10.1016/j.soildyn.2022.107175**
- [21] Zhang X, Han Q, Bi K, Du X. An improved multi-mode seismic vibration control method using multiple tuned mass dampers. *Advances in Structural Engineering*. 2022 Mar;25(4):804-19. **doi:10.1177/13694332211050977**
- [22] Khodaie N. Parametric study of wind-induced vibration control of tall buildings using TMD and TLCD systems. In *Structures 2023 Nov 1* (Vol. 57, p. 105126). Elsevier. **doi:10.1016/j.istruc.2023.105126**
- [23] Pekcan G, Linke C, Itani A. Damage avoidance design of special truss moment frames with energy dissipating devices. *Journal of Constructional Steel Research*. 2009 Jun 1;65(6):1374-84. **doi:10.1016/j.jcsr.2008.08.012**
- [24] Mazzoni S, McKenna F, Fenves GL. OpenSees command language manual. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center. 2005 Jan;264.
- [25] Pastia C, Luca SG. Vibration control of a frame structure using semi-active tuned mass damper. *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura*. 2013 Jul 1;59(4):31.
- [26] Kircher C, Deierlein G, Hooper J, Krawinkler H, Mahin S, Shing B, Wallace J. Evaluation of the FEMA P-695 methodology for quantification of building seismic performance factors.