




Performance Evaluation of Vertical Elliptical Tubular Damper on Improving the Behaviour of Chevron-braced Steel Frames

Mohsen Khatibinia^{1*}, Safarkhan Hassani², Shima Bijari³, Sobhan Rostami⁴

¹Associate Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran.

²MSc Student, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran.

³Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran.

⁴Assistant Professor, Department of Civil Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 05.29.2024

Revised: 07.19.2024

Accepted: 09.11.2024

Keyword:

Steel Frames
Chevron Bracing
Metallic Yielding Dampers
Vertical Elliptical Tubular Damper
Ductility
Depreciated Energy

*Corresponding Author:

Mohsen Khatibinia

Email:

m.khatibinia@birjand.ac.ir

ABSTRACT

The buckling of braces in an eccentrically braced system is a major weakness during earthquakes. To overcome this weakness, one of the proposed solutions is the use of metallic yielding dampers at the connection of the brace to the flange beam of the story so that the input energy caused by seismic excitations is dissipated by dampers and the main members of this system (beams, columns, and braces) remain in an elastic state. In addition, construction, installation, and repair of tubular dampers after an earthquake excitation is very easy and low-cost. In this study, the performance of the vertical elliptical tubular damper (VETD) in the chevron braced frame was investigated to dissipate the input energy under cyclic loading and prevent the buckling of braces, and its performance was compared with a vertical tubular damper (VTD) with a circular cross-section. First, the validation of modeling VTD in the chevron-braced frame was implemented in Abaqus finite element software. Then, five VETD samples with the same weight as the VTD samples were selected, and the performance comparison of the sample dampers in the chevron-braced frame under the cyclic loading protocol was studied. The results showed that VETDs have more ductility and energy dissipation than VTDs. The results indicated a 6 to 69% increment in the ductility of frames equipped with VETDs compared to that of VTDs. Furthermore, the comparison of the depreciated energy of dampers indicated that VETDs increased by 6 to 22% in comparison with VTDs.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Among the common lateral load-bearing systems used in steel structures, concentrically braced frames (CBFs) have the highest lateral elastic stiffness and ultimate strength, but the lowest formability. The inherent property of low ductility of the CBF system is due to the buckling of the diagonal members of the brace. The weakness is that this system has low energy loss and ductility. In the inelastic region of the structural behavior, the buckling of braces significantly reduces lateral stiffness and strength. Due to this important weakness, the CBF system is not suitable for areas with high seismic risk. Metallic dampers have been developed to improve the hysteretic behavior of CBFs. Furthermore, the construction of dampers is easy and less costly. Vertical tubular dampers (VTD) with circular cross sections as one of the metallic dampers were proposed in the chevron brace system

In this study, the performance of 5 samples of vertical elliptical tubular dampers (VETD) in the chevron brace system was investigated under standard cyclic loading and was compared with that of VTDs. The samples of VETD and VTD were of the same weight. For this purpose, modeling the damper was first implemented in Abaqus software and its results compared with previous studies, and then the performance of the VETD and VTD samples in a chevron-braced frame was investigated by modeling in Abaqus.

Methodology

In this study, Abaqus software was used for modeling and validating finite element modeling. To check the accuracy of the modeling, the results of the analysis obtained from the software of this study were compared with the results of the chevron-braced frame model equipped with a VTD presented by Mohemmi and Zahrai [19]. In Figure 1, the results of the hysteresis curve (in terms of the floor level displacement (beam) and the frame base-shear) obtained from the analysis of the finite elements of the modeling of this study were compared with those of the modeling carried out by Mohemmi and Zahrai [19] which demonstrated very good agreement.

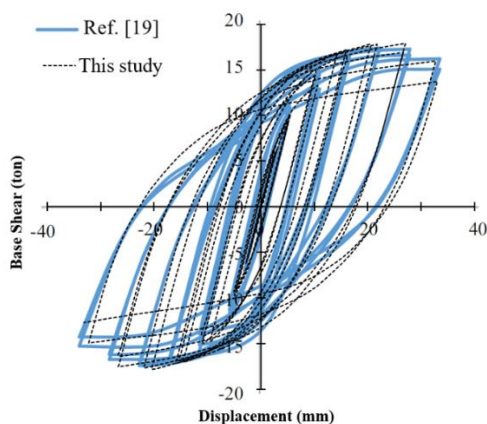


Figure 1. Comparison of the modeling results of the present study with reference [19].

In this study, five VETD samples with different diameters and thicknesses of 4 and 5 mm were selected so that the weight of the samples of VTD used in the chevron-braced system studied by Moheemmi and Zahrai [19] was the same. The geometric characteristics of the VETD samples are shown in Table 1:

Table 1. Geometric properties of VETD.

Name of sample	Large diameter (mm)	Small diameter (mm)	Thickness (mm)	Area (mm ²)
E-a72b48t5	72	48	5	864
E-a90b62t5	90	62	5	1115.3
E-a107b71t4	107	71	4	1068.1
E-a122b81t4	122	81	4	1225.2
E-a137.4b91.4t4	137.4	91.4	4	1387.3

Results and discussion

To compare the performance of the dampers in the chevron-braced frame, the energy dissipated by the dampers can be compared with each other. For this purpose, using Abaqus modeling output, the results of dissipated energy by the samples of VETD and VTD dampers were obtained and displayed in Table 2.

Table 2. Comparison of energy dissipation of VETD and VTD dampers.

Sample	VTD (ton.m)	VETD (ton.m)	Increment percentage
1	565.8	690.8	22.1
2	687.6	820.7	19.4
3	782.9	828.9	5.8
4	876.1	985.3	12.7
5	938.2	1040.7	10.9

As can be observed from the results, VETD dampers have a higher ability to dissipate energy entering the frame than VTD dampers, so the increment percentage in energy dissipation by VETD compared to VTD dampers is between 22.1 and 5.8 percent. Therefore, VETD dampers have a very good performance in absorbing energy and controlling braced frames and can be used as a suitable option in controlling braced frames.

Using the results of bilinear curves, the yield displacement, ultimate displacement and ductility of the frames equipped with VETD and VTD dampers are shown in Table 3. As can be observed from the results, the frame equipped with a VETD damper is more ductile. It should be noted that the ductility is obtained from the ratio of the ultimate displacement to the yield displacement of the frame in each sample.

Table 3. Yield and ultimate displacements and ductility of the brace frame equipped with dampers.

Sample	VETD			VTD		
	Yield displacement (mm)	Ultimate displacement (mm)	Ductility	Yield displacement (mm)	Ultimate displacement (mm)	Ductility
1	7.0	32.7	4.67	7.5	20.7	2.76
2	8.5	26.7	3.26	8.0	20.6	2.26
3	9.0	30.2	3.35	8.7	27.4	3.15
4	8.0	33.1	4.14	8.5	26.5	3.11
5	8.0	32.6	4.08	8.5	26.6	3.13

Conclusion

In this study, the performance of the vertical elliptical tubular damper (VETD) in the Chevron braced frame was evaluated to prevent the buckling of the braces and was compared with the vertical tubular dampers with a circular section (VTD). To achieve this goal, five samples of VETDs were selected to have the same weight as the samples of VTDs in the main reference. Then, the numerical modeling of the chevron-braced frame equipped with VETD and VTD dampers was performed using the finite element method in Abaqus software under standard cyclic loading. Finally, the numerical modeling results under cyclic loading were obtained as follows:

- 1- Based on the comparison of the ductility of the frame equipped with dampers, it was observed that the frames equipped with VETD dampers had better ductility than VTD dampers with an increment of 6.4% to 69.2%.
- 2- Based on the comparison of the energy consumption graphs, it was observed that VETD dampers consumed greater energy than VTD dampers, and their percentage increased from 5.8 to 22.1.



ارزیابی عملکرد میراگر لوله‌ای بیضوی قائم بر بهبود رفتار قاب‌های فولادی مهاربندی شورون

محسن خطیبی نیا^{۱*}، صفرخان حسنی^۲، شیما بیجاری^۳، سبحان رستمی^۴

- ۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
- ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
- ۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
- ۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مَهَرَت، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

کمانش بادبندها در سیستم مهاربندی همگرا ضعیفی عمده در هنگام وقوع زلزله‌ها می‌باشد. یکی از راهکارهای پیشنهادی برای غلبه بر این ضعف، استفاده از میراگرهای فلزی تسلیم‌شونده در محل اتصال بادبند به تیر طبقه است به طوری که انرژی ورودی ناشی از تحریک‌های لرزه‌ای توسط میراگرهای تسلیم‌شونده مستهلک می‌شود و اعضای اصلی این سیستم (تیر، ستون و مهاربند) در حالت کشش باقی می‌ماند. علاوه بر این، ساخت، نصب و تعمیر میراگرهای لوله‌ای شکل پس از زلزله بسیار آسان و کم‌هزینه است. در این تحقیق، عملکرد میراگر لوله‌ای بیضوی قائم در قاب مهاربندی‌شده شورون به‌منظور استهلاک انرژی ورودی تحت بارگذاری چرخه‌ای و جلوگیری از کمانش بادبندها بررسی شده است و عملکرد آن با میراگر لوله‌ای با سطح مقطع دایره‌ای مقایسه شده است. ابتدا، اعتبارسنجی مدل‌سازی نمونه میراگر لوله‌ای در قاب مهاربندی‌شده شورون در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شده است. در ادامه، ۵ نمونه میراگر لوله‌ای بیضوی با وزن برابر با نمونه‌های میراگر لوله‌ای دایره‌ای انتخاب شده است و مقایسه عملکرد این نمونه میراگرها در قاب مهاربندی شورون تحت پروتکل بارگذاری چرخه‌ای مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که میراگرهای لوله‌ای بیضوی شکل‌پذیری و استهلاک انرژی بیشتری نسبت به میراگرهای لوله‌ای دایره‌ای دارند. نتایج حاکی از افزایش شکل‌پذیری قاب‌های مجهز شده به میراگرهای لوله‌ای بیضوی نسبت به میراگر لوله‌ای بین ۶ تا ۶۹ درصد است. همچنین، از مقایسه انرژی مستهلک‌شده مشاهده می‌شود که میراگرهای لوله‌ای بیضوی نسبت به میراگرهای لوله‌ای دایره‌ای، باعث افزایش ۶ تا ۲۲ درصدی می‌شود.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱

کلید واژگان:

قاب‌های فولادی
مهاربند شورون
میراگرهای تسلیم‌شونده
میراگر لوله‌ای بیضوی قائم
شکل‌پذیری
استهلاک انرژی

*نویسنده مسئول: محسن خطیبی نیا

پست الکترونیکی:

m.khatibinia@birjand.ac.ir



مقدمه

در میان سیستم‌های باربر جانبی متداول مورد استفاده در سازه‌های فولادی، سیستم قاب‌های مهاربندی همگرا^۱ (CBF) دارای بالاترین سختی الاستیک جانبی و استحکام نهایی است در حالی که کمترین شکل‌پذیری را دارد. خاصیت ذاتی شکل‌پذیری کم سیستم CBF به دلیل کمناش اعضای مورب مهاربند است که باعث می‌شود اتلاف انرژی این سیستم به شدت کاهش یابد. از این رو در ناحیه غیرارتجاعی رفتار سازه، کمناش به میزان قابل توجهی سختی و استحکام جانبی را نیز کاهش می‌دهد. به دلیل این ضعف اساسی و علی‌رغم سختی ارتجاعی جانبی بالای سیستم CBF، این سیستم برای مناطق با خطر لرزه‌ای بالا مناسب نمی‌باشد [۱؛ ۲]. برای غلبه بر این ضعف، در چند دهه اخیر راه‌حلهایی شامل کاهش نسبت لاغری [۳]، استفاده از پیکربندی بهینه برای این سیستم [۴] و تقویت این سیستم با استفاده از دستگاه‌های مستهلک‌کننده انرژی [۵] ارائه شده است. علاوه بر این، محققان [۶] نشان داده‌اند که لغزش بین دال و رابط تیر به انرژی مستهلک‌شده توسط این سیستم کمک می‌کند و تقاضای شکل‌پذیری در قسمت‌های دیگر مانند انتهای تیر و اتصالات کاهش می‌یابد. استفاده از پیکربندی بهینه و همچنین کاهش نسبت لاغری مهاربندها، از تخریب سیستم CBF جلوگیری نمی‌کند. اگرچه عملکرد لرزه‌ای سیستم CBFها را بهبود می‌بخشد اما به‌طور کلی کاهش سختی و مقاومت سیستم CBF، توانایی سیستم برای استهلاک انرژی ورودی را کاهش می‌دهد.

در بین ایده‌های ارائه‌شده برای غلبه بر ضعف سیستم CBF، استفاده از دستگاه‌های مستهلک‌کننده انرژی (میراگرها) در این سیستم، مناسب‌تر است. استفاده از میراگرها در سازه‌ها باعث می‌شود مقدار زیادی از انرژی لرزه‌ای ورودی در این دستگاه‌ها مستهلک شود و در نتیجه آسیب لرزه‌ای عمدتاً به این دستگاه‌ها محدود شود [۷]. علاوه بر این، دستگاه‌های جاذب انرژی، تقاضای لرزه‌ای سازه‌ها را کاهش می‌دهند. این دستگاه‌ها از مزایای قابل توجهی به‌ویژه در افزایش اتلاف و افزایش توان انرژی سازه‌ها برخوردار هستند اما هزینه‌های اضافی بر ساخت سازه را تحمیل می‌کنند. مقایسه انواع میراگرها نشان می‌دهد که میراگرهای غیرفعال نسبت به انواع میراگرهای فعال و نیمه‌فعال، ارزان‌تر و آسان‌تر ساخته می‌شوند و نیاز به منبع انرژی خاصی ندارند. در میان انواع موجود میراگرهای غیرفعال، میراگرهای فلزی تسلیم‌شونده^۲ یکی از مؤثرترین و اقتصادی‌ترین مکانیسم‌ها برای اتلاف انرژی لرزه‌ای هستند که از طریق تغییر شکل غیرالاستیک مصالح فلزی حاصل می‌شود [۱]. در چند دهه اخیر، استفاده از میراگرهای فلزی تسلیم‌شونده به‌منظور جلوگیری از کمناش بادبندها در سیستم CBF و بهبود عملکرد این سیستم مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است به‌طوری که استفاده از این میراگرها به دو صورت شامل اضافه‌شدن به سیستم مهاربندی (افزودن غیرمستقیم) و اتصال مستقیم به اعضای مهاربندی پیشنهاد شده است [۲].

در گروه اول، میراگرها بین تیر تراز طبقه و اعضای مهاربندی (بادبندهای) سیستم CBF متصل می‌شوند (شکل الف)). از جمله این میراگرها می‌توان به میراگرهای صفحه فولادی (که به‌عنوان افزایش‌دهنده میرایی و سختی^۳ شناخته می‌شود) (ADAS) [۸]، مثلثی (TADAS) ADAS [۹؛ ۱۰]، لوزی [۱۱]، X شکل [۱۲]، شکافدار [۱۳]، نوارهای پیش‌خم مثلثی شده [۱۴]، میراگرهای فولادی منحنی [۱۵]، میراگرهای برشی [۱۶] و فولادی لانه‌زنبوری شش‌ضلعی [۱۷] اشاره کرد. مطالعات گذشته بیانگر آن است که این میراگرها عملکرد لرزه‌ای مطلوبی از خود نشان می‌دهند اما ساخت آنها به کیفیت بالایی نیاز دارد. بنابراین ضعف اصلی این میراگرها پیچیدگی در نحوه ساخت و سوز آنها است. برای غلبه بر این نقیصه و استفاده از مزایای آن، محققان پیوندهای برشی شامل پانل‌های برشی IPE [۱۸]، میراگرهای لوله‌ای جعبه‌ای و لوله‌ای [۱۹] و میراگرهای بیضوی افقی [۲۰] را پیشنهاد کرده‌اند.

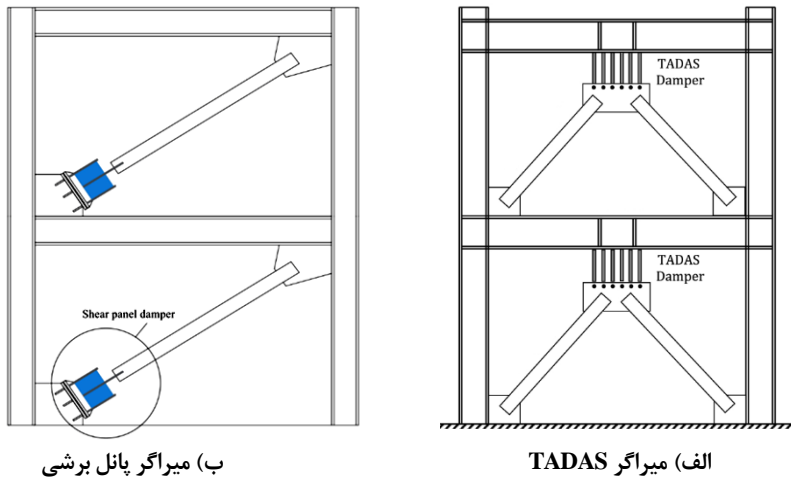
گروه دوم میراگرها (که مستقیماً به عضو بادبندی اضافه می‌شوند) نسبت به میراگرهای غیرمستقیم در سیستم CBF

¹ Concentrically braced frame

² Metallic yielding dampers

³ Added damping and stiffness

مقرون به صرفه‌تر هستند (شکل ب). از میان میراگرهای طبقه‌بندی شده، پانل برشی انعطاف‌پذیر مهاربندی شده [۲۱]، فولادی U شکل [۲۲]، تیر پیچشی [۲۳]، میراگرهای لوله مخروطی [۲۴]، مهاربند کماتش‌ناپذیر (BRB) [۲۵]، میراگر L شکل متصل به عضو مهاربندی مورب [۲۶]، میراگر برشی X [۲۷] و میراگرهای جعبه‌ای [۲۸] عموماً به عنوان میراگرهای شناخته شده این طبقه‌بندی اشاره کرد.



ب) میراگر پانل برشی

الف) میراگر TADAS

شکل ۱. نحوه استفاده از میراگرها در سیستم CBF.

در سال‌های اخیر، مطالعاتی در این زمینه وجود داشته است و محققان میراگرهای جدیدی را پیشنهاد کرده‌اند. در سال ۲۰۲۱، فارسی و همکاران [۲۹] میراگر تسلیمی C شکل را در انتهای عضو مهاربندی به منظور بهبود عملکرد سیستم CBF پیشنهاد دادند. برای این منظور، بررسی‌های پارامتریک به صورت تحلیلی و عددی در این مطالعه انجام شد. در سال ۲۰۲۳، قمری و همکاران [۳۰] استفاده از فولاد با نقطه تسلیم پایین برای بهبود رفتار پیوندهای برشی [شکل به عنوان میراگر تسلیمی فلزی در انتهای عضو مهاربندی را ارزیابی کردند. دورسون و تپکایا^۱ [۳۱] در سال ۲۰۲۳ میراگر هیستریزیس H شکل برای استفاده در انتهای عضو مهاربندی با مقطع [شکل را پیشنهاد دادند. در این مطالعه، کارآمدی میراگر پیشنهادی به صورت آزمایشگاهی و مطالعه عددی ارزیابی شد. اخیراً قدمی و همکاران [۳۲] برای بهبود عملکرد سیستم CBF نوع جدیدی از میراگر با مقطع قوطی (جعبه‌ای) در انتهای عضو مهاربندی را ارائه دادند. همچنین وان و قمری^۲ [۳۳] یک مطالعه تجربی و عددی بر روی میراگر پیشنهادی فلزی با سطح مقطع قوطی (جعبه) برای بهبود رفتار سیستم CBF را انجام دادند.

همان‌طور که در بالا اشاره شد به دلیل پیچیدگی ساخت و ساز میراگرهای گروه اول، میراگرهای لوله‌ای قائم (VTD)^۳ با مقطع دایره [۱۹] در سیستم مهاربندی شورون پیشنهاد شده است و مزیت‌های میراگرهای لوله‌ای در مطالعات پیشین به اثبات رسیده است. اما تاکنون مطالعه‌ای در زمینه عملکرد میراگرهای لوله‌ای قائم با مقطع بیضی در سیستم بادبندی شورون و اثر آن در شکل‌پذیری، نیروی برش پایه تسلیم و نهایی و استهلاک انرژی این سیستم انجام نشده است. بنابراین

¹ Dursun and Topkaya

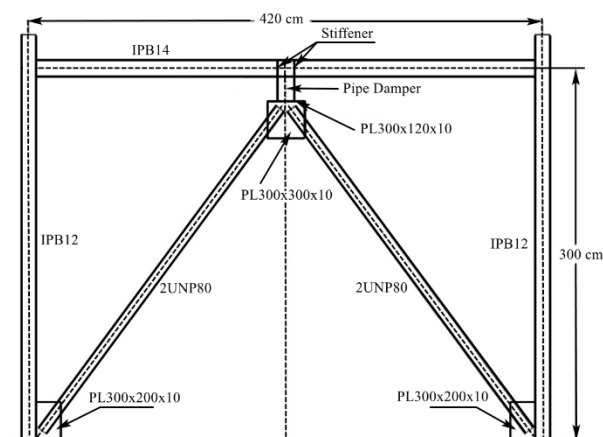
² Van & Ghamari

³ Vertical Tubular Damper

در این مطالعه، عملکرد ۵ نمونه میراگرهای قائم لوله‌ای بیضوی^۱ (VETD) در سیستم بادبندی شورون بررسی شده و عملکرد آنها با عملکرد میراگرهای لوله‌ای قائم با مقطع دایره‌ای و با وزن یکسان تحت بارگذاری چرخه‌ای استاندارد مقایسه شده است. برای این منظور در این مطالعه، ابتدا مدل‌سازی میراگر در نرم‌افزار آباکوس انجام شده و نتایج آن با مطالعات پیشین مقایسه شده و سپس عملکرد نمونه‌های میراگر بیضوی و دایره‌ای در یک قاب بادبندی شورون با مدل‌سازی در آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است.

صحت‌سنجی مدل‌سازی

در این پژوهش، از نرم‌افزار اجزای محدودی آباکوس جهت مدل‌سازی و صحت‌سنجی آن استفاده شده است. به‌منظور بررسی صحت مدل‌سازی، نتایج تحلیل حاصل از نرم‌افزار آباکوس در این پژوهش با نتایج مدل قاب مهاربندی شده شورون مجهز شده به میراگر لوله‌ای با مقطع دایره‌ای (VTD) در مرجع [۱۹] مقایسه شده است. شکل ۲ جزئیات مدل قاب مهاربندی شده شورون مجهز به VTD را به تفصیل نشان می‌دهد. میراگر لوله‌ای به قطر ۷۶/۱ میلی‌متر، ضخامت ۵ میلی‌متر و به طول ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ۲. جزئیات قاب مهاربندی شورون مجهز به میراگر لوله‌ای [۱۹].

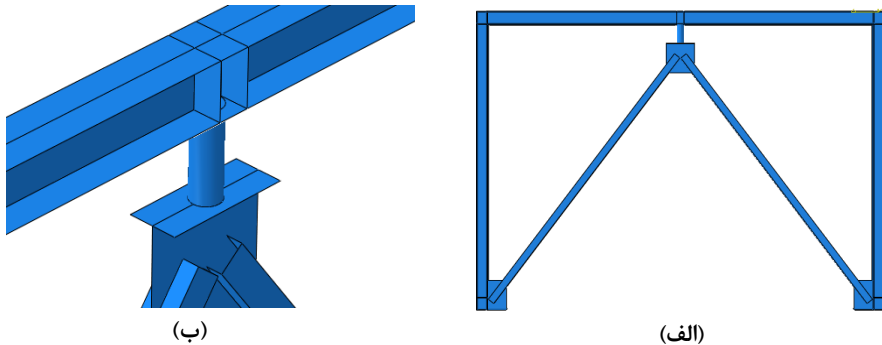
مشخصات فولاد مصرفی برای اعضای قاب (شامل تیر، ستون، بادبند، سخت‌کننده‌ها و ورق‌های اتصال بادبند به قاب) و میراگر مطابق جدول ۲ می‌باشد. فولاد مصرفی برای اعضای قاب دارای سختی کرنشی (منحنی دوخطی) فرض شده است. مصالح به‌صورت سخت‌شدگی ایزوتروپیک در مدل‌سازی لحاظ شده است. همچنین برای وقوع شکست در میراگر، پارامترهای شکست فولاد در مدل‌سازی نرم‌افزار لحاظ شده است.

جدول ۱. مشخصات فولاد مورد استفاده برای میراگر لوله‌ای و اعضای قاب [۱۹].

تنش تسلیم (kg/cm ²)	تنش نهایی (kg/cm ²)	کرنش پلاستیک	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	چگالی (kg/m ³)	عضو
۳۶۱۰	۵۰۷۹	۰.۲۵	۲۱۰	۰.۳	۷۸۵۰	میراگر لوله‌ای
۲۴۰۰	۳۶۰۰	۰.۱۸	۲۱۰	۰.۳	۷۸۵۰	اعضای قاب

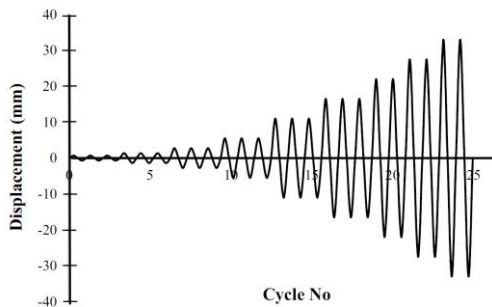
¹ Vertical Elliptical Tubular Damper

در نرم‌افزار آباکوس، اعضای قاب با المان پوسته^۱ نازک ۴ گرهی و میراگر لوله‌ای با المان آجری خطی^۲ ۸ گرهی برای مدل‌سازی استفاده شده است. همچنین روش انتگرال‌گیری کاهشی برای دقت مدل‌سازی میراگر به کار رفته است. مدل قاب بادبندی شورون مجهز شده به میراگر لوله‌ای در شکل ۳ نشان داده شده است



شکل ۳. الف) مدل قاب بادبندی شورون با میراگر لوله‌ای. ب) مدل میراگر لوله‌ای متصل به تیر و بادبند.

همچنین در مدل‌سازی، از وزن میراگر و قاب صرف‌نظر شده است. شرایط انتقالی تکیه‌گاه‌های پای ستون‌ها در سه جهت مقید شده است و قسمت بال بالای تیر در دو جهت خارج از صفحه XY مقید فرض شده است. برای وقوع کمناش در بادبندها، از روش نقص اولیه در وسط عضوهای بادبندی استفاده شده است. بارگذاری جانبی قاب بر اساس الگوی بارگذاری ارائه شده در ATC-24 می‌باشد [۱۹]. بر این اساس، بارگذاری جانبی با استفاده از کنترل جابه‌جایی اعمال شده در سه چرخه می‌باشد که در هریک از آنها، ۰/۱۲۵، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، و ۳ برابر جابه‌جایی تسلیم قاب و دو چرخه تا ۴ برابر جابه‌جایی تسلیم قاب تا گسیختگی نمونه در نظر گرفته شده است. در شکل ۴، الگوی بارگذاری فوق نشان داده شده است.



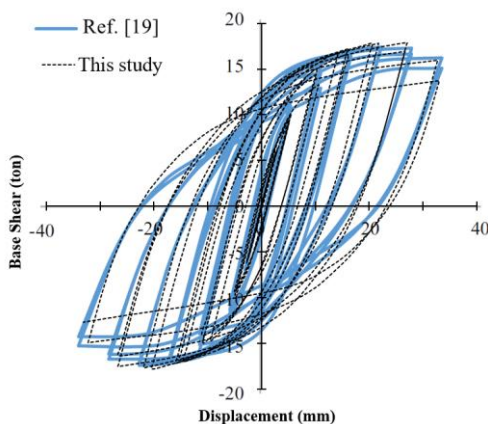
شکل ۴. الگوی بارگذاری ATC-24 اعمال شده به قاب [۱۹].

در شکل ۵، نتایج منحنی هیستریزیس (برحسب جابه‌جایی تراز طبقه (تیر) و برش پایه قاب) به دست آمده از تحلیل اجزای محدود مدل‌سازی این مطالعه با نتایج مدل‌سازی مهمی و زهرایی [۱۹] مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد

¹ Shell

² Linear break

که انطباق بسیار خوبی بین مدل‌سازی این مطالعه و مدل‌سازی انجام‌شده در مرجع [۱۹] وجود دارد. از این‌رو با اطمینان از صحت مدل‌سازی، در ادامه می‌توان از این نحوه مدل‌سازی برای میراگرهای لوله‌ای بیضوی استفاده کرد. شایان ذکر است دلیل اختلاف ناچیز بین نتایج این مطالعه با مرجع [۱۹]، ارائه‌نشدن مقادیر پارامترهای شکست میراگر در مرجع اصلی می‌باشد بنابراین در این مطالعه، این مقادیر با سعی و خطا برای انطباق با نتایج مرجع فوق تعیین شده است.



شکل ۵. مقایسه نتایج مدل‌سازی مطالعه حاضر با مرجع [۱۹].

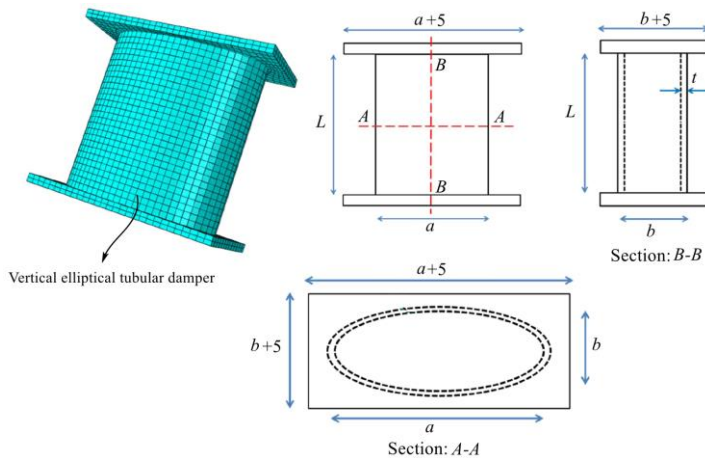
مشخصات هندسی میراگرهای لوله‌ای بیضوی قائم (VETD)

در این تحقیق، ۵ نمونه VETD با قطرهای متفاوت و ضخامت جداره ۴ و ۵ میلی‌متر طوری انتخاب شده است که با وزن ۵ نمونه میراگرهای لوله‌ای با سطح مقطع دایره‌ای (VTD) مورد استفاده در سیستم مهاربندی شورون پژوهش مهمی و زهرایی [۱۹]، یکسان باشد. شایان ذکر است طول میراگرهای بیضوی و دایره‌ای یکسان می‌باشد. این نمونه انتخابی میراگرها برای قاب باندندی نشان داده‌شده در شکل ۲ مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات هندسی ۵ نمونه VETD در جدول ۲ نشان داده شده است:

جدول ۲. مشخصات هندسی VETD.

نام نمونه	قطر بزرگ a (mm)	قطر کوچک b (mm)	ضخامت t (mm)	مساحت A (mm ²)	نسبت ابعاد a/b
E-a۷۲b۴۸t۵	۷۲	۴۸	۵	۸۶۴	۱.۵۰
E-a۹۰b۶۲t۵	۹۰	۶۲	۵	۱۱۱۵.۳	۱.۴۵
E-a۱۰۷b۷۱t۴	۱۰۷	۷۱	۴	۱۰۶۸.۱	۱.۵۱
E-a۱۲۲b۸۱t۴	۱۲۲	۸۱	۴	۱۲۲۵.۲	۱.۵۱
E-a۱۳۷.4b۹۱.۴t۴	۱۳۷.۴	۹۱.۴	۴	۱۳۸۷.۳	۱.۵۰

در جدول ۲، نامگذاری VETD به صورت E-aAbBtT انجام شده است که در آن A ، B و T به ترتیب معرف اندازه قطر بزرگ، قطر کوچک و ضخامت میراگرها برحسب میلی‌متر می‌باشد. همچنین در شکل ۶، جزئیات VETD نشان داده شده است:



شکل ۶. جزئیات VETD (ابعاد بر حسب میلی‌متر).

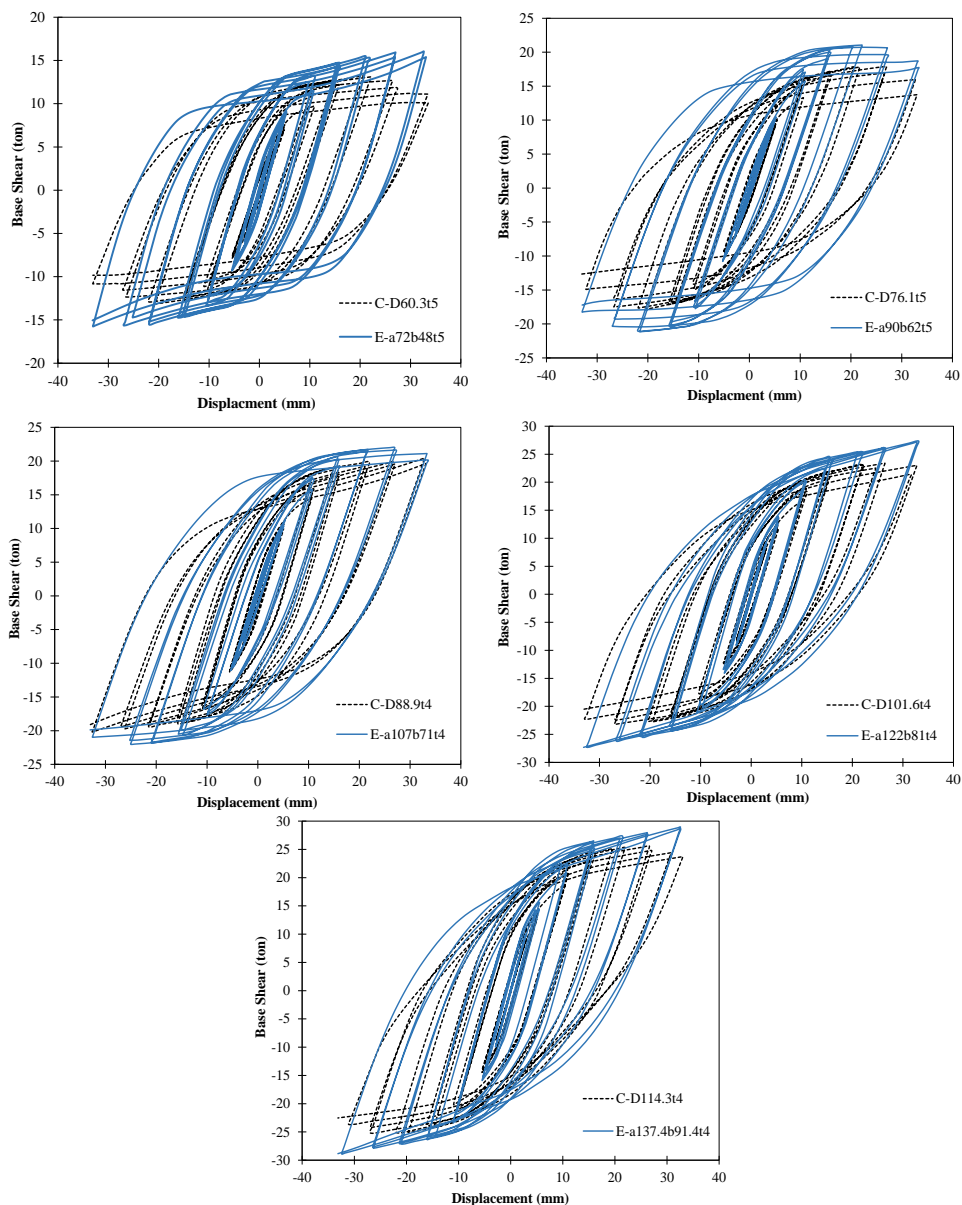
در جدول ۳، مشخصات هندسی ۵ نمونه جزییات VTD نشان داده شده است و نامگذاری آنها به صورت C-DAT در انجام شده است که در آن A و T به ترتیب معرف اندازه قطر و ضخامت بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۳. مشخصات هندسی VTD.

نام نمونه	قطر D (mm)	ضخامت t (mm)	مساحت A (mm ²)
C-D۶۰.۳۱۵	۶۰.۳	۵	۸۶۸.۶۵
C-D۷۶.۱۲۵	۷۶.۱	۵	۱۱۱۶.۸۴
C-D۸۸.۹۲۴	۸۸.۹	۴	۱۰۶۶.۸۵
C-D۱۰۱.۶۱۴	۱۰۱.۶	۴	۱۲۲۶.۴۸
C-D۱۱۴.۳۱۴	۱۱۴.۳	۴	۱۳۶۸.۰۷

مقایسه نمودار هیستریزیس

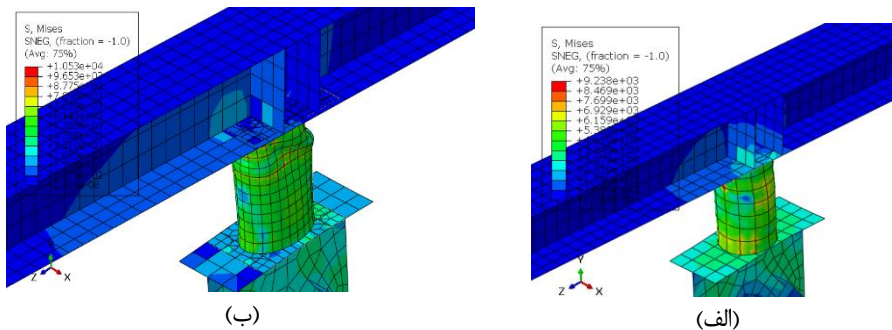
مقایسه نمودار هیستریزیس قاب مجهز شده (شکل ۴) به نمونه میراگرهای VETD و VTD در شکل ۷ نشان داده شده است. محور افقی این نمودارها نشان‌دهنده جابه‌جایی جانبی بال بالایی تیر و محور عمودی آنها میزان برش پایه ستون‌ها (قاب) است.



شکل ۷. مقایسه نمودار هیستریزیس قاب مهاربندی مجهز شده به میراگرهای VETD و VTD.

سطح زیر منحنی در هر چرخه میزان انرژی مستهلک شده به دلیل تسلیم شدن میراگرها را نشان می‌دهد. هنگامی که این ناحیه در هر چرخه بزرگتر می‌شود، نشان‌دهنده سطوح بالاتر از اتلاف انرژی است. در چرخه‌های اولیه، همه اعضا در محدوده الاستیک قرار دارند و رفتار کشسانی از خود نشان می‌دهند. در این حالت سطح زیر منحنی تقریباً صفر است و اتلاف انرژی رخ نمی‌دهد و فقط انرژی در اعضای قاب ذخیره می‌شود. در چرخه‌های بعدی به دلیل ورود میراگر

به محدوده غیرارتجاعی، سطح زیر منحنی به تدریج بزرگ‌تر می‌شود که به این معنی است که انرژی بیشتری به دلیل تغییرشکل‌های ناشی از پلاستیک‌شدن میراگر مستهلک می‌شود و اعضای اصلی سازه در حالت الاستیک باقی‌مانده و آسیبی به آنها وارد نمی‌شود. همان‌طور که از مقایسه نمودارهای هیستریزیس قاب مجهز شده به ۵ نمونه میراگرهای VETD و VTD به خوبی دیده می‌شود قاب مجهز شده به میراگرهای VETD در تمام نمونه‌ها استهلاک انرژی بیشتری نسبت به میراگرهای VTD دارد و در نتیجه انرژی بیشتری در میراگرهای VETD جذب شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد پیش از گسیختگی میراگرها، هیچ‌گونه کمانشی در بادبندها رخ نداده است. در ادامه، مقایسه کانتور تنش فون میسز و نحوه توزیع تنش‌ها نمونه پنجم از میراگرهای VETD و VTD در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸. کانتور تنش فون میسز میراگرهای: الف) C-D114.۳۲۴، ب) E-a1۳۷.۴b۹۱.۴۲۴

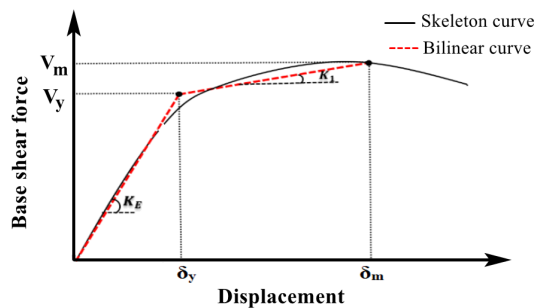
مقایسه نمودار دوخطی

برای مقایسه بهتر عملکرد میراگرها، نمودار (منحنی) دوخطی^۱ قاب مجهز شده به میراگرها با استفاده از روش یانگ^۲ [۳۴] و منحنی اسکلتون^۳ به دست می‌آید تا که بتوان اطلاعات و نتایج قابل مقایسه‌ای را تعیین کرد. در روش یانگ، منحنی اسکلتون در محدوده کشسان (الاستیک) را ادامه می‌دهد تا برش پایه تسلیم به دست آید و سپس به برش پایه حداکثر وصل کرد به طوری که انرژی کرنشی ذخیره شده تغییر نکند. در این حالت، سطح زیر نمودار اسکلتون برابر با سطح زیر نمودار منحنی دوخطی می‌باشد (شکل). شایان ذکر است منحنی اسکلتون همان پوش منحنی هیستریزیس در ربع اول می‌باشد که از وصل کردن نقاط حداکثر در هر چرخه منحنی هیستریزیس به دست می‌آید. شایان ذکر است استفاده روش یانگ در دستورالعمل‌های معتبر مانند FEMA-۳۵۶ و ASCE-۴۱ اعتبار بیشتری دارد.

¹ Bilinear Diagram (Curve)

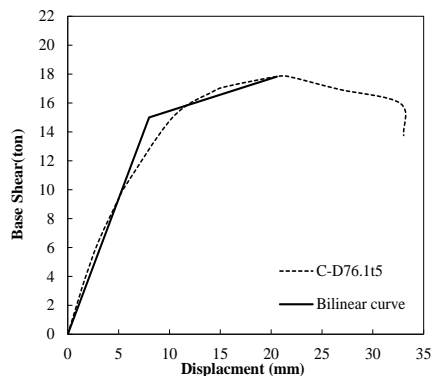
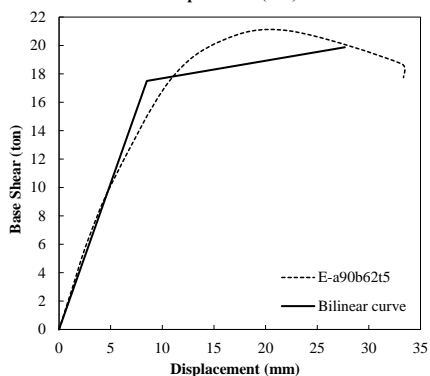
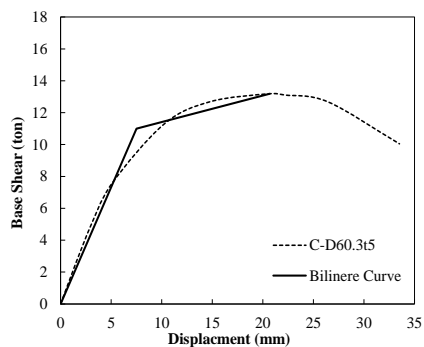
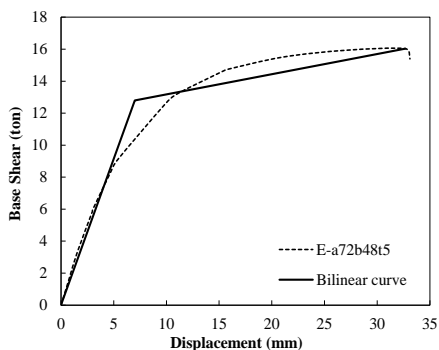
² Uang Method

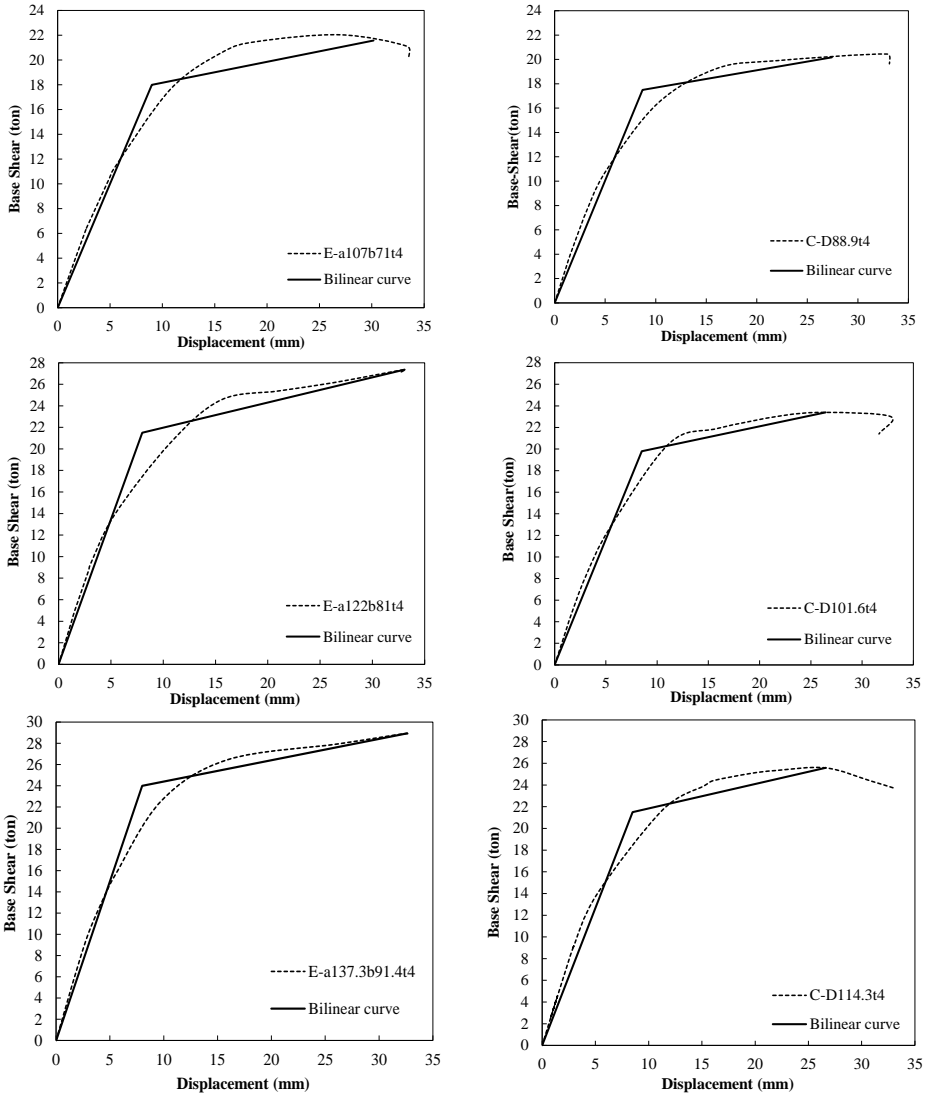
³ Skeleton Curve



شکل ۹. تبدیل منحنی اسکلتون به منحنی دوخطی.

با توجه به منحنی دوخطی (شکل ۹) می‌توان مقادیر نیروی برش پایه تسلیم (V_y) و نهایی (V_m) را به دست آورد. همچنین می‌توان جابه‌جایی حد تسلیم (δ_y) و نهایی (δ_m) قاب را تعیین کرد تا به کمک آن شکل‌پذیری قاب مهاربندی را به دست آورد. در ادامه، مقایسه نمودار اسکلتون و دوخطی قاب مهاربندی مجهز شده به میراگرهای VTD و VETD در شکل ۹ نمایش داده شده است.





شکل ۱۰. مقایسه نمودار دوخطی قاب مهاربندی مجهز شده به میراگرهای VETD و VTD.

از مقایسه منحنی‌های دوخطی نشان داده شده در شکل ۹ می‌توان دریافت که عملکرد کلی قاب مهاربندی مجهز شده به میراگرهای VETD نسبت به میراگرهای VTD بهتر می‌باشد. اما در ادامه برای مقایسه بهتر عملکرد میراگرهای VETD و VTD به صورت کمی، مقادیر نیروی برش پایه تسلیم و نهایی قاب برای حالت‌های مجهز شده به میراگرهای VETD و VTD حاصل از نمودارهای دوخطی در جدول ۴ درج شده است. همچنین مقایسه نیروی برش پایه تسلیم و نهایی در حالت قاب مجهز شده به میراگر VETD نسبت به قاب مجهز شده به میراگر VTD به صورت درصد تغییرات (افزایش) در جدول ۴ بیان شده است.

جدول ۴. نیروی برش پایه تسلیم و نهایی قاب مجهز شده به میراگرها.

نمونه	نیروی برشی تسلیم (ton)		درصد افزایش	نیروی برشی نهایی (ton)		درصد افزایش
	VTD	VETD		VTD	VETD	
۱	۱۲.۸	۱۱.۰	۱۶.۴	۱۳.۱۹	۱۶.۰۳	۲۱.۵
۲	۱۷.۵	۱۵.۰	۱۶.۷	۱۷.۸۳	۱۹.۸۸	۱۱.۵
۳	۱۸.۰	۱۷.۵	۲.۹	۲۰.۱۷	۲۱.۵۷	۶.۹
۴	۲۱.۵	۱۹.۸	۸.۶	۲۳.۴۰	۲۷.۳۷	۱۶.۹
۵	۲۴.۰	۲۱.۵	۱۱.۳	۲۵.۵۹	۲۸.۹۴	۱۳.۱

براساس نتایج جدول ۴، قاب مجهز شده به میراگرهای VETD نسبت به میراگرهای VTD توانایی تحمل نیروی برش پایه تسلیم و نهایی بیشتری را دارد. به طوری که درصد افزایش نیروی برش پایه تسلیم و نهایی قاب مجهز شده به میراگرهای VETD نسبت به میراگرهای VTD به ترتیب بین ۱۲/۸ تا ۲۴ و ۸/۶ تا ۱۶/۷ مشاهده می‌شود. این عملکرد مطلوب ناشی از افزایش مقاومت میراگرهای VETD نسبت به میراگرهای VTD می‌باشد. در ادامه با استفاده از نتایج منحنی‌های دوخطی، جابه‌جایی تسلیم و نهایی قاب مجهز با میراگرهای VETD و VTD در جدول ۵ نمایش داده شده است. همچنین شکل‌پذیری قاب مجهز به میراگرها که از نسبت جابه‌جایی نهایی به جابه‌جایی تسلیم به دست می‌آید، در جدول ۵ گزارش شده است.

جدول ۵. جابه‌جایی تسلیم و نهایی و شکل‌پذیری قاب مجهز شده به میراگرها.

نمونه	VETD		شکل‌پذیری	VTD		شکل‌پذیری
	جابه‌جایی تسلیم (mm)	جابه‌جایی نهایی (mm)		جابه‌جایی تسلیم (mm)	جابه‌جایی نهایی (mm)	
1	7.0	32.7	4.67	7.5	20.7	2.76
2	8.5	26.7	3.26	8.0	20.6	2.26
3	9.0	30.2	3.35	8.7	27.4	3.15
4	8.0	33.1	4.14	8.5	26.5	3.11
5	8.0	32.6	4.08	8.5	26.6	3.13

همان‌طور که از نتایج جدول ۵ مشاهده می‌شود قاب مجهز شده به میراگر VETD نسبت به میراگرهای VTD شکل‌پذیری بیشتری دارد، به طوری که شکل‌پذیری قاب مجهز شده به میراگر VETD بین ۱/۰۶ تا ۱/۷ نسبت به قاب مجهز شده به میراگر VTD افزایش داشته است. این افزایش شکل‌پذیری قاب مجهز شده به میراگر VETD ناشی از افزایش قابل توجه جابه‌جایی نهایی قاب نسبت به میراگر VTD می‌باشد.

مقایسه انرژی مستهلک شده

به منظور مقایسه عملکرد میراگرها در قاب بادبندی شورون، می‌توان انرژی مستهلک شده توسط میراگرها را با یکدیگر مقایسه کرد. برای این منظور، با استفاده از خروجی مدل‌سازی آباکوس نتایج انرژی مستهلک شده توسط نمونه‌های میراگرهای VETD و VTD به دست آمد که در جدول ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود میراگرهای VETD نسبت به میراگرهای VTD توانایی استهلاک بالاتری از انرژی ورودی به قاب را دارند به طوری که درصد افزایش استهلاک انرژی توسط VETD نسبت به میراگرهای VTD بین ۲۲/۱ تا ۵/۸ درصد می‌باشد. شایان ذکر است این افزایش استهلاک، به دلیل افزایش سختی و مقاومت خمشی و برشی سطح مقطع میراگرهای VETD نسبت

به میراگرهای VTD به ازای وزن یکسان می‌باشد. از این‌رو، میراگرهای VETD دارای عملکرد بسیار مناسبی در جذب انرژی و کنترل قاب‌های بادبندی هستند و می‌تواند به‌عنوان گزینه مناسبی در کنترل قاب‌های مهاربندی شورون برای جلوگیری از کمانش بادبندها استفاده شوند.

جدول ۶. مقایسه استهلاک انرژی میراگرهای VETD و VTD.

نمونه	VETD (ton.m)	VTD (ton.m)	درصد افزایش
۱	۶۹۰.۸	۵۶۵.۸	۲۲.۱
۲	۸۲۰.۷	۶۸۷.۶	۱۹.۴
۳	۸۳۸.۹	۷۸۲.۹	۵.۸
۴	۹۸۵.۳	۸۷۶.۱	۱۲.۷
۵	۱۰۴۰.۷	۹۳۸.۲	۱۰.۹

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، عملکرد میراگر لوله‌ای بیضوی قائم (VETD) در قاب بادبندی شورون به‌منظور جلوگیری از کمانش بادبندها ارزیابی گردید و با میراگرهای لوله‌ای قائم با سطح مقطع دایره‌ای (VTD) مقایسه شد. برای رسیدن به این هدف، ۵ نمونه میراگر VETD طوری انتخاب گردید تا با نمونه‌های میراگرهای VTD در مرجع اصلی وزن یکسانی داشته باشند. سپس مدل‌سازی عددی قاب بادبندی شورون مجهز شده به میراگرهای VETD و VTD با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس تحت بارگذاری چرخه‌ای استاندارد انجام شد. در نهایت، نتایج مدل‌سازی عددی تحت بارگذاری چرخه‌ای به‌صورت زیر به‌دست آمد:

- ۱- نتایج نمودارهای هیستریزس نشان داد که قاب مجهز با میراگرهای VETD نسبت به VTD، عملکرد مناسب‌تر دارد و سطح زیر نمودار هیستریزس آنها بیشتر می‌باشد.
- ۲- مقایسه منحنی‌های دوخطی قاب مجهز شده به میراگرها نشان داد که درصد افزایش نیروی برشی تسلیم از $2/9$ تا $16/7$ و درصد نیروی افزایش برشی نهایی $6/9$ تا $23/5$ در قاب مجهز شده به میراگرهای VETD نسبت به VTD نتیجه گردید.
- ۳- از مقایسه شکل‌پذیری قاب مجهز شده به میراگرها مشاهده گردید که قاب‌های مجهز شده به میراگرهای VETD دارای شکل‌پذیری بهتری نسبت به میراگرهای VTD با افزایش $6/4$ تا $69/2$ درصدی را نشان داد.
- ۴- از مقایسه نمودارهای استهلاک انرژی به‌خوبی دیده شد که میراگرهای VETD نسبت به میراگرهای VTD انرژی بیشتری را مستهلک کرده است و افزایش درصد آن از $5/8$ تا $22/1$ را نشان می‌دهد. به‌طور کلی نتایج به‌دست آمده بالا نشان می‌دهد عملکرد میراگرهای VETD نسبت به VTD در افزایش شکل‌پذیری، استهلاک انرژی، نیروی برش پایه حد تسلیم و نهایی بسیار مؤثر بوده است. علاوه بر این، میراگرهای VETD در کنترل و جلوگیری از کمانش بادبندهای سیستم قاب مهاربندی شورون بسیار مطلوب می‌باشد. این عملکرد مطلوب ناشی از افزایش سختی و مقاومت خمشی و برشی میراگرهای VETD نسبت به VTD می‌باشد.

References

- [1] Ghamari, A., & Jeong, S. H. (2022). A proposal for improving the behavior of CBF braces using an innovative flexural mechanism damper, an experimental and numerical study. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 45(3), 455-466. <https://doi.org/10.12989/scs.2022.45.3.455>

- [2] Thongchom, C., Ghamari, A., Putra Jaya, R., & Benjeddoud, O. (2023). Experimental and Numerical Study on an Innovative Trapezoidal-Shaped Damper to Improve the Behavior of CBF Braces. *Buildings*, 13(1), 140. <https://doi.org/10.3390/buildings13010140>
- [3] Shademan Heidari, P., Ahmady Jazany, R., & Kayhani, H. (2012). An investigation on bracing configuration effects on behavior of concentrically braced steel frames. *World Applied Sciences Journal*, 17(9), 1095-1108. https://www.researchgate.net/publication/289026819_An_investigation_on_bracing_configuration_effects_on_behavior_of_concentrically_braced_steel_frames
- [4] Yang, T. Y., Sheikh, H., & Tobber, L. (2019). Influence of the Brace Configurations on the Seismic Performance of Steel Concentrically Braced Frames. *Frontiers in Built Environment*, 5, 27. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00027>
- [5] De Domenico, D., Ricciardi, G., & Takewaki, I. (2019). Design strategies of viscous dampers for seismic protection of building structures: A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 118(9), 144-165. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.12.024>
- [6] Vasdravellis, G., Valente, M., & Castiglioni, C. A. (2009). Dynamic response of composite frames with different shear connection degree. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(10-11), 2050-2061. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.05.001>
- [7] Symans, M. D., Charney, F. A., Whittaker, A. S., Constantinou, M. C., Kircher, C. A., Johnson, M. W., & McNamara, R. J. (2008). Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments. *Journal of Structural Engineering*, 134(1), 3-21. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:1\(3\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(3))
- [8] Xia, C., & Hanson, R. D. (1992). Influence of ADAS Element Parameters on Building Seismic Response. *Journal of Structural Engineering*, 118(7), 1903-1918. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:7\(1903\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:7(1903))
- [9] Gray, M., Christopoulos, C., & Packer, J. (2016). Design and Full-Scale Testing of a Cast Steel Yielding Brace System in a Braced Frame. *Journal of Structural Engineering*, 143, 04016210. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001692](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001692)
- [10] Tsai, K-C., Chen, H-W., Hong, C-P., & Su, Y-F. (1993). Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction. *Earthquake Spectra*, 9(3), 505-528. <https://doi.org/10.1193/1.1585727>
- [11] Han, Q., Jia, J., Xu, Z., Bai, Y., & Song, N. (2014). Experimental Evaluation of Hysteretic Behavior of Rhombic Steel Plate Dampers. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 185629. <https://doi.org/10.1155/2014/185629>
- [12] Guo, W., Wang, X., Yu, Y., Chen, X., Li, S., Fang, W., Zeng, C., Wang, Y., & Bu, D. (2020). Experimental study of a steel damper with X-shaped welded pipe halves. *Journal of Constructional Steel Research*, 170(5), 106087. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106087>
- [13] Oh, S-H., Kim, Y-J., & Ryu, H-S. (2009). Seismic performance of steel structures with slit dampers. *Engineering Structures*, 31(9), 1997-2008. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.03.003>
- [14] Wang, Y-P., & Chien, C-S. C. (2009). A study on using pre-bent steel strips as seismic energy-dissipative devices. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38(8), 1009-1026. <https://doi.org/10.1002/eqe.880>
- [15] Hsu, H. L., & Halim, H. (2017). Improving seismic performance of framed structures with steel curved dampers. *Engineering Structures*, 130, 99-111. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.09.063>

- [16] Ghamari, A., Haeri, H., Khaloo, A., & Zhu, Z. (2019). Improving the hysteretic behavior of Concentrically Braced Frame (CBF) by a proposed shear damper. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 30(4), 383-392. <https://doi.org/10.12989/scs.2019.30.4.383>
- [17] Javanmardi, A., Ghaedi, K., Ibrahim, Z., Huang, F., & Xu, P. (2020). Development of a new hexagonal honeycomb steel damper. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20(2), 63. <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00063-9>
- [18] Zahrai, S. M. (2015). Cyclic testing of chevron braced steel frames with IPE shear panels. *Steel and Composite Structures*, 19, 1167-1184. <https://doi.org/10.12989/scs.2015.19.5.1167>
- [19] Mohemmi, M., & Zahrai, S. M. (2022). Cyclic behavior of CBFs having vertical pipe and box fuses with different aspect ratios. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(4), 250. <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00849-1>
- [20] Zahrai, S. M., & Hosein Mortezaagholi, M. (2018). Cyclic Performance of an Elliptical-Shaped Damper with Shear Diaphragms in Chevron Braced Steel Frames. *Journal of Earthquake Engineering*, 22(7), 1209-1232. <https://doi.org/10.1080/13632469.2016.1277436>
- [21] Giannuzzi, D., Ballarini, R., Huckelbridge, A., Pollino, M., & Valente, M. (2014). Braced Ductile Shear Panel: New Seismic-Resistant Framing System. *Journal of Structural Engineering*, 140(2), 04013050. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000814](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000814)
- [22] Taiyari, F., Mazzolani, F. M., & Bagheri, S. (2019). A proposal for energy dissipative braces with U-shaped steel strips. *Journal of Constructional Steel Research*, 154(1), 110-122. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.031>
- [23] Mahyari, S., Tajmir Riahi, H., & Hashemi, M. (2019). Investigating the analytical and experimental performance of a pure torsional yielding damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 161, 385-399. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.07.010>
- [24] He, Z., & Chen, Q. (2021). Upgrading the seismic performance of underground structures by introducing lead-filled steel tube dampers. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 108(3), 103727. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103727>
- [25] Wang, C-L., Qing, Y., Wu, J., Wang, J., & Gu, Z. (2020). Analytical and experimental studies on buckling-restrained brace with gap-supported tendon protection. *Journal of Constructional Steel Research*, 164, 105807. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105807>
- [26] Qu, B., Dai, C., Qiu, J., Hou, H., & Qiu, C. (2019). Testing of seismic dampers with replaceable U-shaped steel plates. *Engineering Structures*, 179, 625-639. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.016>
- [27] Thongchom, C., Bahrami, A., Ghamari, A., & Benjeddou, O. (2022). Performance Improvement of Innovative Shear Damper Using Diagonal Stiffeners for Concentrically Braced Frame Systems. *Buildings*, 12(11), 1794. <https://doi.org/10.3390/buildings12111794>
- [28] Miao, F., Nejati, F., Zubair, S. A. M., & Yassin, M. E. (2022). Seismic Performance of Eccentric Braced Frame Retrofitted by Box Damper in Vertical Links. *Buildings*, 12(10), 1506. <https://doi.org/10.3390/buildings12101506>
- [29] Farsi, A., Amiri, H. R., & Dehghan Manshadi, S. H. (2021). An innovative C-shaped yielding metallic dampers for steel structures. *Structures*, 34(8), 4254-4268. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.069>

- [30] Ghamari, A., Thongchom, C., Putra Jaya, R., & Sithole, T. (2023). Utilizing Low Yield Point Steel to Improve the Behavior of the I-Shaped Shear Links as Dampers. *Buildings*, 13(2), 554. <https://doi.org/10.3390/buildings13020554>
- [31] Dursun, S. E., & Topkaya, C. (2023). Development of H-shaped hysteretic dampers for steel concentrically braced frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 166(5), 107758. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107758>
- [32] Ghadami, A., Ghamari, A., & Putra Jaya, R. (2024). Improving the behavior of the CBF system using an innovative box section damper: Experimental and numerical study. *Structures*, 62, 106210. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106210>
- [33] Van, C. N., & Ghamari, A. (2024). An experimental and numerical study on the innovative metallic box-section damper for improving the behavior of CBF systems. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering-Hanoi University of Civil Engineering*, 18(2), 45-55. [https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18\(2\)-04](https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18(2)-04)
- [34] Uang, C. M., & Maarouf, A. (1994). Deflection Amplification Factor for Seismic Design Provisions. *Journal of Structural Engineering*, 120(8), 2423-2436. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1994\)120:8\(2423\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:8(2423))