

Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 57(3) (2025) 445-468 DOI: 10.22060/ceej.2025.23688.8197

Evaluation of the Effect of Two-Part and Three-Part Braces on the Seismic Behavior of Strongback Braced Frames

Aryan Fatahzadeh, Ali Biglarifadafan * 回

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran

ABSTRACT: Steel bracing frames are efficient systems for resisting seismic loads. However, multistory steel bracing frames tend to concentrate seismic demands in one or more stories in response to severe ground vibrations. Therefore, in recent years, mechanisms have been presented to distribute inelastic demands over the height of the structure. Strongback braced frame is one of the efforts made in this field. This system, using an elastic truss at the height of the structure, redistributes demands to other floors. In most studies conducted on conventional steel braces, they have been used as energy dissipation elements, while due to the buckling of the braces, adequate energy dissipation is not seen in these structures. In this study, the possibility of improving the behavior of a buckling-restrained braced frame with a crescent-shaped brace was evaluated. Initially, to provide more flexibility in design, a threepart brace or trapezoid brace was introduced, and finally, the possibility of improving the behavior of a strongback braced frame by adding a crescent-shaped or trapezoid brace was evaluated with Nonlinear static analysis. The results showed that the use of a crescent-shaped or trapezoid brace, while improving the energy dissipation of the structure by up to 440.9% and increasing the shear capacity of the structure by up to 57%, did not significantly increase the stiffness of the structure (maximum 14%) and the forces generated in the elastic truss elements formed a uniform distribution over the height of the structure.

Review History:

Received: Nov. 20, 2024 Revised: Jan. 28, 2025 Accepted: Mar. 06, 2025 Available Online: Mar. 30, 2025

Keywords:

Crescent-Shaped Brace Trapezoid Brace Strongback Braced Frame Nonlinear Static Analysis Performance Improvement

1- Introduction

One of the common failure mechanisms in buildings is the soft-story mechanism. In this failure mode, due to the loss of lateral resistance in a story, structural failure occurs, preventing the optimal utilization of the structure's capacity. In conventional steel-braced structures, the formation of a soft-story mechanism is likely during severe earthquakes [1].

To mitigate this mechanism, various structural systems have been proposed and studied, including dual systems [2], zipper-braced frames [3], and spine systems [4]. Lai and Mahin [5] introduced the strongback system, which consists of an elastic truss, responsible for ensuring uniform deformation in the structure, along with a nonlinear section that facilitates energy dissipation and yielding. The nonlinear section in this system offers significant flexibility in configuration, allowing for the use of various energy absorption mechanisms.

Among the technologies developed to enhance the structural behavior, crescent-shaped braces can be mentioned [6]. In this study, while introducing the three-part brace or trapezoid brace as a novel configuration, the potential improvement in the performance of steel strongback-braced frames(which was introduced by Lai and Mahin [5]) by adding crescent-shaped and trapezoid braces has been investigated. Numerical simulations are performed using

Opensees software.

2- Three-part or trapezoid brace

The aim of this configuration is to facilitate retrofit operations, enhance design flexibility, determine the failure behavior, and allow for the incorporation of replaceable components. Additionally, when using this brace for retrofitting existing structures, the designer can adjust the diagonal inclination based on the structure's dimensions to ensure feasibility in execution. Fig. 1. illustrates the configuration of this brace.



Fig. 1. The geometrical configuration of the trapezoid brace

*Corresponding author's email: Biglari.a@gmail.com



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.



Fig. 2. Monotonic force-deformation curve of trapezoid braces: a) Tensile Behavior, b) Compressive behavior

3- Design Flexibility

Fig. 2 presents the monotonic force-deformation curve of the specimens. Under tensile loading, it can be generally stated that reducing the eccentricity of the braces leads to an increase in their initial stiffness. Moreover, increasing the length of the inclined region reduces the diagonal inclination, thereby decreasing the geometric hardening. Based on the obtained results, it can be concluded that the behavior of this brace is well-controllable by the structural designer and offers high flexibility in design.

4- Concentration of Nonlinear Behavior in the Central Section

In this brace, by increasing the stiffness of different parts, failure can be concentrated in specific regions. Focusing the failure in the central section not only reduces the length of the vulnerable region but also provides more favorable practical conditions for replacing the damaged regions or components as shown in Fig. 3.



Fig. 3. Cyclic force-displacement curve of trapezoid brace with: a) L1=30% and ζ =8%, b) L1=35% and ζ =9%, c) L1=40% and ζ =9%

5- Behavior improvement of Strongback Braced Frames using crescent or trapezoid brace

The advantages of the crescent-shaped brace include its ability to dissipate energy in the early cycles and at low forces, as well as its high deformation capacity and favorable performance during large earthquakes. Utilizing this feature for the retrofitting of conventional concentrically braced systems can enhance the structural behavior, improving both performance and ductility in this structural system. In Fig. 4, the illustration of the proposed models is presented, and in Fig5., the hysteresis analysis results are shown.

Adding a crescent-shaped brace (SBS-C2S) resulted in a 10.4% increase in the maximum shear capacity and a 10% increase in the initial stiffness of the structure compared to the base model (SBS-Base). After the complete failure



Fig. 4. Elevation views of models

of the primary braces at 3% drift, the crescent-shaped braces reached their maximum tensile capacity, providing structural resistance. Given that half of the story braces were simultaneously subjected to tension, the structural resistance in the final loading cycles was approximately half of the maximum base shear of the baseline model. The use of a crescent-shaped brace led to a 202.5% increase in energy dissipation.

Adding the trapezoid brace (SBS-C3S) resulted in a 13% increase in the maximum shear capacity, a 10.9% increase in the initial stiffness of the structure compared to the base model (SBS-Base). Overall, the use of the trapezoid brace resulted in a 134.8% increase in energy dissipation compared to the baseline model.

Adding the dual crescent-shaped brace (SBS-2C2S) resulted in a 57% increase in the maximum shear capacity and a 13.7% increase in the initial stiffness of the structure compared to the base model (SBS-Base). The total energy dissipation of this model increased by 440.9% compared to the baseline model.

6- Conclusions

The strongback braced frame with conventional steel braces does not exhibit adequate ductility or energy dissipation capacity. In this study, while introducing a new crescentshaped brace configuration to enhance design flexibility, the potential improvement of cyclic behavior in steel bracing systems through the addition of crescent-shaped braces was evaluated. The key findings are summarized as follows:

1- The behavior of the three-part (trapezoid) brace can be effectively controlled by the structural designer by adjusting key parameters such as eccentricity and inclined region length, providing greater design flexibility. Additionally, the behavioral characteristics of this brace, including stiffness and geometric hardening, align with the relationships derived for the two-part crescent-shaped brace, allowing engineers to



Fig. 5. Cyclic static pushover curves of models

tune its performance based on these formulations.

2- Adding crescent-shaped and trapezoid braces to the fully steel strongback bracing system does not significantly increase the initial stiffness of the structure (only between 10% and 14%). However, it enhances energy dissipation by up to 440.9%, demonstrating favorable structural behavior.

References

- C.-H. Chen, Performance-based seismic demand assessment of concentrically braced steel frame buildings, University of California, Berkeley, 2010.
- [2] S. Kiggins, C.-M. Uang, Reducing residual drift of buckling-restrained braced frames as a dual system, Engineering Structures, 28(11) (2006) 1525-1532.
- [3] R. Tremblay, L. Tirca, Behaviour and design of multistorey zipper concentrically braced steel frames for the mitigation of soft-storey response, in: STESSA 2003-Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, Routledge, 2018, pp. 471-477.
- [4] A. Martin, G.G. Deierlein, Generalized modified modal superposition procedure for seismic design of rocking and pivoting steel spine systems, Journal of Constructional Steel Research, 183 (2021) 106745.
- [5] J.-W. Lai, S.A. Mahin, Strongback System: A Way to Reduce Damage Concentration in Steel-Braced Frames, Journal of Structural Engineering, 141(9) (2015) 04014223.
- [6] M. Palermo, L. Pieraccini, A. Dib, S. Silvestri, T. Trombetti, Experimental tests on Crescent Shaped Braces hysteretic devices, Engineering Structures, 144 (2017) 185-200.

نشريه مهندسي عمران اميركبير

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۷، شماره ۳، سال ۱۴۰۴، صفحات ۴۴۵ تا ۴۶۸ DOI: 10.22060/ceej.2025.23688.8197

ارزیابی اثر مهاربند دوبخشی و سهبخشی در بهبود رفتار لرزهای قاب با مهاربندی پشتیبانقوی

آرین فتاح زاده، علی بیگلری فدافن* [©]

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان،گرگان، ایران.

خلاصه: قابهای مهاربندی فولادی، از سیستمهای مقاوم کارآمد در برابر بارهای لرزهای هستند. بااین وجود، قابهای مهاربندی فولادی چندطبقه در پاسخ به لرزشهای شدید زمین، تمایل به تمرکز نیازهای لرزهای در یک یا چند طبقه دارند. ازاین رو در سالیان اخیر مکانیز مهایی ارائه شده تا نیازهای غیرالاستیک را در ارتفاع سازه توزیع کند. سیستم قاب پشتیبیان قوی از جمله تلاشهای صورت گرفته در این زمینه است. این سیستم با استفاده از یک خرپا الاستیک در ارتفاع سازه، بازتوزیع نیازها را در سایر طبقات انجام می دهد. در اکثر مطالعات صورت گرفته از مهاربندهای فولادی مرسوم به عنوان المان اتلاف انرژی استفاده شده است در حالی که به علت کمانش مهاربندها، در این سازهها اتلاف انرژی مناسبی دیده نمی شود. در این مطالعه امکان بهبود رفتار قاب مهاربندی پشتیبان قوی با مهاربندهای هلالی شکل (دوبخشی) و مهاربند تراپوزاید (سه بخشی) مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا بهمنظور انعطاف پذیری بیشتر در طراحی، مهاربندهای ملالی شکل (دوبخشی) و مهاربند تراپوزاید (سه بخشی) مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا بهمنظور انعطاف پذیری بیشتر و تراپوزاید با تحلیل استاتیکی غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بیانگر آن بود که استفاده از این مهاربندها، ضمن بهبود اتلاف انرژی سازه تا ۹/۴۴۰ و افزایش ظرفیت برش قابل تحمل در سازه تا ۲۵٪، سختی سازه را به شکل قابل توجهی افزایش نداده (حداکثر با روزی سازه تا ۹/۴۴۰ و افزایش ظرفیت برش قابل تحمل در سازه تا ۲۵٪، سختی سازه را به شکل قابل توجهی افزایش نداده (حداکثر به روزی سازه تا ۱۹۰۹ بینده در المانهای خرپا الاستیک، توزیع یکنواختی را در ارتفاع سازه مازه می دهند.

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۰۹ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۶ ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۱/۱۰

کلمات کلیدی: مهاربند هلالیشکل مهاربند تراپوزاید قاب پشتیبانقوی تحلیل استاتیکی غیرخطی بهبود رفتار

۱ – مقدمه

از شیوههای خرابی مرسوم در ساختمانها میتوان به مکانیزم طبقه نرم اشاره کرد. در این مکانیزم خرابی، به علت ازدست رفتن مقاومت جانبی یک طبقه، خرابی در سازه اتفاق افتاده و موجب عدم استفاده بهینه از ظرفیت سازه میشود. در سازههای مهاربندی فولادی مرسوم، ایجاد مکانیزم طبقه نرم در زمین لرزههای شدید محتمل است. تمرکز تغییر شکل در یک یا چندطبقه منجر به آسیبهای سازهای و غیرسازهای شدید و یا موجب خرابی نابهنگام مهاربندها می شود؛ بنابراین بسیار مطلوب خواهد بود تا بتوان از تمرکز آسیب و همچنین طبقه نرم جلوگیری نمود [۱].

بهمنظور مقابله با این مکانیزم، سیستمهای سازهای متفاوتی ارائه و بررسی شده که از جمله آنها میتوان به سیستمهای دوگانه [۲]، قابهای مهاربندی زیپر [۳] و سیستمهای ستونفقراتی [۴] اشاره کرد. سیستمهای ستونفقراتی امکان توزیع تغییرمکان تحت مود اول را فراهم کرده و مانع تشکیل طبقه نرم میشوند. این سیستمها را میتوان به دو دسته تقسیم

نمود: الف) قابهای مهاربندی شده گهوارهای که در آن ستونها امکان بلندشدگی دارند، ب) سیستمهای چرخشی که حول یک نقطه ثابت در تراز پایه دوران میکنند. مطالعات انجام شده بر روی سیستمهای گهوارهای بیانگر عملکرد مناسب این سیستم در جلوگیری از طبقه نرم بوده و همچنین رفتار مرکزگرایی (جابهجایی باقی مانده ناچیز) را از خود نشان داده است [۵]. در خصوص استفاده از قابهای ستونفقراتی چرخشی مطالعات قابل توجهی صورت گرفته است.

کو^۱ و همکاران [۶] استفاده از هسته صلب گهوارهای^۲ به منظور مقاومسازی قابهای مهاربندی را معرفی کردند. در این روش یک هسته صلب با اتصال تکیه گاهی مفصلی (و یا اتصالات با مقاومت خمشی ناچیز) به قاب موجود متصل شده و یک ستون فقرات الاستیک^۲، صلب و پیوسته در ارتفاع سازه را تشکیل می دهد. این عمل، موجب بازتوزیع نیازهای جانبی در سازه شده و تغییر شکل یکنواختی در ارتفاع سازه ایجاد می شود. بلبو و روک^۴ [۷] به

- 3. Elastic Spine
- 4. Blebo and roke

* نویسنده عهدهدار مکاتبات: biglari.a@gmail.com

^{1.} Qu

^{2.} Sitff Rocking Core



شکل ۱. مقایسه نحوه تشکیل مکانیزم در قاب مهاربند همگرا و قاب پشتیبانقوی[۹]

Fig. 1. Comparison of Mechanism Formation in a Concentrically Braced Frame and a Strongback Frame

معرفی سیستم هسته گهوارهای مرکزگرا پرداختند. در این سیستم استفاده از کابلهای پستنیده در دو طرف هسته گهوارهای، عملکرد مرکزگرایی کسب میشود. چن^۱ و همکاران [۸] به معرفی سیستم ستونفقراتی کنترل شونده پرداختند. این سیستم از یک قاب فولادی مهاربندی صلب، ستونهای کمانش تاب و قاب خمشی تشکیل شده است. ستونهای کمانش تاب وظیفه اتلاف انرژی را به عهده دارد و بعد از زلزله قابل تعویض خواهد بود. قاب خمشی به نحوی طراحی میشود تا الاستیک باقی بماند تا تغییر شکلهای باقی مانده کاهش پیدا کرده و بدون نیاز به نیروهای پستنیدگی عملکرد مرکزگرایی ایجاد شود.

لای و ماهین^۲ [۹] سیستم پشتیبانقوی (شکل ۱) را معرفی کردند که شامل یک خرپا الاستیک، که وظیفه ایجاد تغییرشکل یکنواخت در سازه را داشته، به همراه بخش غیرخطی، که وظیفه اتلاف انرژی و تسلیمشدگی را به همراه دارد، است. ناحیه الاستیک این مهاربند شامل ستون، مهاربندهای ارتجاعی و قید است. این المانها به نحوی طراحی میشوند که عملکرد الاستیک خود را حفظ نمایند. سیمپسون^۳ [۱۰] متوجه شد استفاده از آییننامههای طراحی سازه فعلی که تنها اثرات مود اول را درنظر میگیرد، امکان طراحی مناسب خرپا الاستیک فراهم نمیباشد و در مطالعه دیگری [۱۱] روش تحلیل پوش آور مودال سادهشده را پیشنهاد داد. مارتین و

دییرلین^{*} [*] روش برهمنهی مودال اصلاحشده و فرامرزی و تقی خانی [۱۲] نیز روش طیف فرکانسی تسلیمی را پیشنهاد دادند. فرامرزی و تقی خانی نیز در مطالعهای دیگر [۱۳] متوجه شدند افزایش طول ناحیه غیرارتجاعی و افزایش صلبیت خرپا الاستیک، موجب افزایش شکلپذیری، اضافه مقاومت و همچنین افزایش ظرفیت فروریزش سازه میشود.

بخش غیرخطی در این سیستم از لحاظ شیوه پیکربندی، انعطاف پذیری زیادی داشته و میتوان از شیوههای مختلف جذب انرژی از قبیل مهاربند معمولی، مهاربند کمانش تاب، میراگرهای ویسکوز و... استفاده کرد. مهاربندهای فولادی مرسوم به علت کمانش، شکل پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی پایینی دارند به همین خاطر امکان استفاده از المانهای جاذب انرژی میتواند موجب بهبود قابل توجه رفتار سازه شود.

به منظور بهبود رفتار سازه، رویکردهای مختلفی توسط مهندسین مورد ارزیابی قرار گرفته است که سیستمهای کنترل سازه غیرفعال را میتوان از محبوب ترین گزینه ها دانست [۱۴]. میراگرهای تسلیمی یکی از انوع سیستم کنترل سازه غیرفعال بوده که با استفاده از تغییر شکلهای غیرار تجاعی مصالحشان، اتلاف انرژی را انجام میدهند. پیکربندی های مختلفی به منظور استفاده از این میراگرها معرفی شده که از میان آن ها میتوان به میراگرهای افزاینده سختی و میرایی^۵ (ADAS) [۱۵]، مهاربندهای بیضی گون [۱۶] و مهاربند با عضو لوزی شکل [۱۷] اشاره کرد.

^{1.} Chen

^{2.} Lai and Mahin

^{3.} Simpson

^{4.} Martin and Deierlein

^{5.} Added Damping and Stiffness

به منظور بهبود رفتار هیسترزیس قاب مهاربندی پشتیبانقوی، استفاده از مهاربندهای کمانشتاب [۹, ۱۸] و لینکهای برشی [۱۹] در مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی در پژوهشهای متعددی به عنوان المان ناحیه غیرارتجاعی مورد استفاده قرار گرفته است. مهاربندهای کمانشتاب با وجود توانایی مناسب در اتلاف انرژی، امکان تعویض پذیری مناسبی نداشته و بعد از رخداد زلزله در صورت خرابی، نیاز به جایگزینی کامل دارند.

از جمله تکنولوژیهایی که برای بهبود رفتار سازهها توسعه داده شدهاند، میتوان به مهاربندهای هلالی شکل ^۱ اشاره کرد. این مهاربند که برای اولین بار در سال ۲۰۰۹ معرفی شد [۲۰]، با داشتن هندسه منحنی و با ترکیب نمودن رفتار خمشی و محوری، منحنی رفتاری به شکل بومرنگ داشته و این امکان را برای طراحان فراهم کرده، تا طیف وسیعی از سختی، مقاومت، شکل پذیری و توانایی اتلاف انرژی را با توجه به شرایط سازه، انتخاب کنند. همچنین این رفتار موجب شده تا امکان درنظر گیری حالتهای عملکردی مختلف، برای این مهاربند مهیا شود. این موضوع آنجایی اهمیت پیدا میکند که عموما رفتار سازه تحت نیروی جانبی، وابسته به رفتار مهاربندها بوده و استفاده از مهاربندی که منحنی رفتاری مشابه با منحنی مدنظر آیین نامه داشته باشد، میتواند در طراحی عملکردی، آزادی طراحی بیشتری را فراهم میکند.

پالرمو^۲ و همکاران [۲۱] به بررسی آزمایشگاهی مهاربند هلالیشکل در مقیاس کوچک پرداختند. آنها متوجه شدند این مهاربند در واقعیت نیز رفتاری مشابه با رفتار تئوری مورد انتظار داشته و امکان استفاده از آن به عنوان یک جایگزین مناسب برای مهاربندهای مرسوم و کمانش تاب وجود دارد.

مختاری و همکاران نیز به بررسی آزمایشگاهی مهاربند هلالیشکل در قاب دوطبقه مهاربندی پرداختند. آنها در مطالعه نخست [۲۲] تنها در طبقه اول از مهاربند هلالیشکل استفاده کردند و به بررسی عملکرد مهاربند هلالیشکل در یک قاب واقعی پرداختند. نتایج این مطالعه بیانگر عملکرد مناسب و قابل انتظار این مهاربند در رفتار چرخهای پایدار و جذب انرژی متوسط این سیستم بدون کاهش سختی و افت مقاومت قابل توجه بود. در این مطالعه مشخص شد که صفحات اتصال نقش قابل توجهی در پاسخ سیستم خواهند داشت. از دلایل این اتفاق میتواند ایجاد رفتار پلاستیک موضعی و اعمال بار قابل توجه در اطراف سوراخ صفحات اتصال (حتی در نیروهای جانبی کوچک) به علت فشار متمرکز وارد شده از پیچها باشد. همچنین تحلیل کرنشی مهاربند بیانگر اعمال کرنش متمرکز قابل توجه در

محل زانویی مهاربند و تشکیل مفصل پلاستیک در این محل است. در مطالعه دوم [۲۳]، آنها به بررسی قاب مهاربندی که درآن از مهاربند هلالی شکل در دو طبقه استفاده شده بود پرداختند. استفاده از مهاربند هلالی شکل در دو طبقه نیز عملکرد مناسب و قابل انتظار را نشان داده و تطابق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و پیشبینی هایی تحلیلی وجود دارد.

امکان استفاده از مهاربندهای هلالی شکل در قابهای مهاربندی فولادی اولینبار توسط پالرمو و همکاران مورد ارزیابی قرار گرفت [۲۴]. آنها در این مطالعه امکان استفاده از مهاربند هلالی شکل به منظور جداسازی لرزهای را بررسی نمودند. در این مطالعه در طبقه اول از مهاربند هلالی شکل و در سایر طبقات از مهاربند معمولی که الاستیک طراحی شدهاند تشکیل شده است. در این سیستم امکان تجمع تغییر مکانها غیر الاستیک را در طبقه اول فراهم نموده و از خرابی در سایر طبقات جلوگیری می شود. نتایج این مطالعه بیانگر عملکرد مناسب این سیستم و همچنین روش طراحی ارائه شده است.

در این پژوهش، ابتدا مروری بر رفتار مهاربند هلالی شکل و روابط تحلیلی آن صورت گرفته است. در ادامه مهاربند سه بخشی یا تراپوزاید به عنوان یک پیکربندی نوین معرفی شده و مزیت های اصلی آن در مقایسه با مهاربند هلالی شکل دوبخشی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس رفتار این مهاربند از طریق تحلیل عددی ارزیابی شده و در پایان، امکان بهبود عملکرد قاب های مهاربندی پشتیبان قوی فولادی با افزودن مهاربندهای هلالی شکل و تراپوزیاد، همراه با کنترل نیروهای ایجاد شده در اعضای خرپای الاستیک، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مهاربند هلالی شکل

مهاربندهای هلالی شکل یک دستگاه فولادی هیسترزیس بوده که با استفاده از پروفیل های فولادی مرسوم درست شده است. این مهاربند باتوجهبه پیکربندی و شیوه قرارگیری در قاب، میتواند رفتار هیسترزیس متقارن یا نامتقارن را از خود نشان بدهد. درصورتی که از یک مهاربند مشابه شکل ۲-الف تشکیل شده باشد رفتار نامتقارن، و در صورتی که به صورت دوگانه و مشابه شکل۲-ب استفاده شود رفتار متقارن خواهد داشت. رفتار مهاربند هلالی شکل به تنهایی بسیار نامتقارن است. علت این پدیده، سختشوندگی قابل توجه این مهاربند در کشش و رفتار نرم در فشار است[۲۱]. در ادامه این بخش توضیحات تکمیلی در خصوص رفتار این مهاربند و روابط حاکم بر آن ذکر شده است.

^{1.} Crescent-shaped brace

^{2.} Palermo



شکل ۲. الف) مهاربند هلالی شکل به صورت تک در قاب به همراه رفتار هیسترزیس نامتقارن آن، ب) مهاربند هلالی شکل به صورت دوگانه در قاب به همراه رفتار هیسترزیس متقارن آن[۲1].

Fig. 2. (a) Single crescent-shaped brace in the frame with its asymmetric hysteresis behavior, (b) Dual crescent-shaped braces in the frame with their symmetric hysteresis behavior



Fig. 3. Force-Displacement Response of the Crescent-Shaped Brace in: (a) Compression, (b) Tension

۲- ۱- رفتار مهاربند هلالی شکل

نمایش داده شده است. در ابتدای رفتار فشاری، مهاربند در محدوده رفتار الاستیک قرار دارد تا زمانی که به نقطه تسلیم خمشی در ناحیه زانویی مقطع P_c برسد. پس از این نقطه، به دلیل اثرات غیرخطی هندسی مهاربند، نرمشدگی اتفاق میافتد. رفتار کششی مهاربند از چهار فاز تشکیل شده است. در فاز اول مهاربند در محدوده خطی و الاستیک عمل می کند تا زمانی که به

نقطه تسليم خمشي اوليه P_{fv} دست يابد، كه اين نقطه معادل با زمان تسليم در شکل ۳ رفتار مهاربند هلالی شکل در حالتهای فشاری و کششی در ناحیه زانویی مقطع است. در فاز دوم، مهاربند در ناحیه شبه پلاستیک قرار گرفته و به واسطه خمیدگی و براساس سختی خمشی، رفتار خود را تا نقطه عملکردی کلیدی دوم P_{eh} ادامه میدهد. در فاز سوم مهاربند به علت اثرات سخت شوندگی هندسی غیرخطی (کاهش خروج از محوریت مهاربند)، سختی محوری مهاربند درگیر شده و افزایش ناگهانی سختی را در پی دارد تا به نقطه تسليم نهايي (P_{av}) با خروج از مرکزيت صفر برسد. در فاز چهارم



شکل ۴. مشخصات هندسی مهاربند هلالی شکل بررسی شده توسط مختاری و همکاران [۲۲]

Fig. 4. Geometric Properties of the Crescent-Shaped Brace Studied by Mokhtari et al.

با صاف شدن سطح مهاربند، مهاربند وارد ناحیه محوری پلاستیکی نهایی میشود [۲۵].

۲- ۲- روابط حاکم بر رفتار مهاربند هلالی شکل

پالرمو و همکاران [۲۶] به ارزیابی رفتار الاستیک مهاربند هلالی شکل پرداختند و روابط سختی اولیه جانبی و مقاومت الاستیک سازه را براساس رفتار محوری و خمشی مهاربند محاسبه کردند. در پژوهش های آتی مشخص شد که میتوان برای مهاربندهای دارای خروج از مرکزیت ۱۰٪ به بالا، از تغییرشکل پذیری محوری مهاربندها صرف نظر نمود[۲۱]. مختاری و همکاران [۲۲] به توسعه این روابط پرداختند که این روابط براساس مشخصات هندسی و پارامترهای ارائه شده در شکل ۴ ارائه شده است. سختی داخل صفحه مهاربند (K_{IN})، مقاومت کششی الاستیک (F_{gy}) و حداکثر ظرفیت کششی (F_{ay}) مطابق روابط ۱ تا ۳ تعیین میشود:

$$K_{IN} = \frac{3}{8} \frac{EJ \cdot \cos \theta_0}{L_0^3 \cdot \xi^2}$$
(1)

$$F_{fy} = \frac{M_y}{d_0} \cdot \gamma = \frac{W_e \cdot f_y}{d_0} \cdot \gamma = \frac{J \cdot f_y}{L_0 \cdot h \cdot \xi} \cdot \gamma \tag{(7)}$$

$$F_{ay} = A.F_{y} \tag{(7)}$$

در روابط ارائه شده f_v تنش تسليم فولاد، E مدول الاستيسيته فولاد،

h ارتفاع مقطع، d_0 بازوی اهرمی، θ_0 زاویه انتهایی مهاربند با افق، J ممان اینرسی داخل صفحه مهاربند، W_e اساس مقطع الاستیک، ζ میزان خروج از مرکزیت و L_0 تصویر افقی المان شیبدار (L^*) است. پارامتر γ ضریب اصلاح بوده و مطابق رابطه ۴ محاسبه می شود. در معادله ۴، i شعاع ژیراسیون مقطع است.

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{h}{2L_0} \cdot \frac{2}{\xi} \cdot \left(\frac{i}{h}\right)^2} \tag{(f)}$$

مقاومت فشاری مهاربند
$$(F_c)$$
 نیز از رابطه ۵ محاسبه می شود:

$$F_{c} = \frac{W_{e}.f_{y}}{d_{0}}.\lambda = \frac{J.f_{y}}{L_{0}.h.\xi}.\lambda$$
 (a)

.در معادله ۵، λ ضریب اصلاح بوده و مطابق رابطه ۶ محاسبه می شود.

$$\lambda = \frac{\beta}{1 + \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{f_y}{E} \cdot \frac{\beta \cdot L_0}{h \cdot \xi \cdot \cos^2 \theta_0}}$$
(5)

در معادله ${\mathcal S}$ ${\mathcal S}$ ضریب شکل یا همان نسبت اساس مقطع پلاستیک به الاستیک است. جدول ۱. یارامترهای مدلسازی مهاربند هلالی شکل

Table 1. Modeling Parameters of the Crescent-Shaped Brace

<i>a</i> 4	<i>a</i> ₃	a_2	a_1	cR_2	cR_1	R_0	b	E (Mpa)	F_y (Mpa)	پارامتر مدلسازی
١	•/•٢	١	•/•٣	۰/۱۵	٠/٩۵	۲.	•/• ١ ١	7	۴	مقدار



شکل ۵. الف) مشخصات نمونه أزمایشگاهی پالرمو و همکاران، ب) پروتکل بارگذاری [۲۱].

Fig. 5. (a) Details of the Experimental Specimen by Palermo et al. (b) Loading Protocol

۳- مدلسازی مهاربند هلالی شکل

جهت ارزیابی رفتار مهاربندهای هلالی شکل، مدل سازی این مهاربند در نرم افزار OpenSees به صورت دوبعدی انجام شد. جهت مدل سازی مهاربند از مصالح OpenSees و از المان dispBeamColumn با پنج نقطه انتگرال گیری استفاده شد. برای تعریف مقاطع المانها نیز از مقاطع رشته ای یا فایبر¹ استفاده شد. برای تعریف مقاطع المانها نیز از مقاطع رشته ی یا فایبر¹ استفاده شد. برای تعریف مقاطع المانها نیز از مقاطع رشته ی یا فایبر¹ استفاده شد. برای تعریف مقاطع المانها نیز از مقاطع رشته ی یا فایبر¹ استفاده شد. برای تعریف مقاطع المانها نیز از مقاطع رشته ی یا فایبر¹ استفاده شد. بارامترهای مدل سازی مصالح در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول پارامترهای مدل سازی مصالح در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول پارامترهای مدل سازی مصالح در جدول ۱ آورده شده ی نسبت مدول الاستیسیته اولیه است. R_0 تسببت مدول الاستیسیته اولیه است. a_1 تسببت مدول الاستیسیته اولیه است. a_1 ترسبت مدول الاستیسیته اولیه است. a_1 ترم و محول الاستیسیته اولیه است. a_1 ترم و مرول الاستیک به پلاستیک به پلاستیک به a_1 ترم و میز و به علت نبود مطالعات کافی، از پارامترهای پیش فرض خود نرم افزار درنظر گرفته شد.

1. Fiber Section

۳- ۱- صحتسنجی مدلسازی مهاربند هلالی شکل

جهت صحت سنجی عملکرد مهاربند هلالی شکل، نتایج مدل سازی عددی توسط نرمافزار OpenSees با نتیجه نمونه های T-L ، R1-T و R1-R مدل آزمایشگاهی پالرمو و همکاران [۲۱] مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵–الف). نمونه های عنوان شده از نظر ابعادی و جنس مصالح مشابه یکدیگر هستند با این تفاوت که نمونه T-L تحت بارگذاری کششی، نمونه R1-C تحت بارگذاری فشاری یک طرفه و نمونه R1-R تحت بارگذاری رفت و برگشتی مطابق پروتکل بارگذاری شکل ۵–ب قرار گرفته است.

در شکل ۶ منحنی نیرو-تغییرمکان مدلسازی عددی و نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. در بارگذاریهای یکطرفه تطابق مناسبی بین نتایج مدلسازی عددی و نتایج نمونه آزمایشگاهی دیده میشود. در بارگذاری چرخهای در بعضی قسمتهای نمودار مدل آزمایشگاهی، برش پایه به صفر رسیده و سپس تغییر مکان مدنظر به آن اعمال شده است. از دلایل این اتفاق میتوان به دستگاه انجام آزمایش اشاره کرد که بعد از



شکل ۶. منحنی نیرو-تغییرمکان مدلسازی عددی و نتایج آزمایشگاهی تحت بارگذاری الف) کششی، ب) فشاری، ج) چرخهای



انجام هر چرخه، باربرداری انجام شده و سپس چرخه بعدی آغاز شده است. در قسمت فشاری نمودار، تفاوت مقاومت قابل توجهی مشاهده می شود که علت آن، کمانش خارج از صفحه نمونه آزمایشگاهی به علت نسبت ارتفاع به عرض نامطلوب نمونه است. از آنجایی که مدل سازی عددی به صورت دو بعدی انجام شده است، رفتار خارج از صفحه مهاربند دیده نشده و در نتیجه کمانش خارج از صفحه در آن شکل نمی گیرد. در بخش کششی، رفتار نمونه آزمایشگاهی به خوبی توسط نرمافزار شبیه سازی شده است و در مجموع می توان اذعان داشت که نرمافزار اپنسیس با دقت قابل قبولی، امکان شبیه سازی رفتار مهاربند هلالی شکل را دارد.

۴– مهاربند سەبخشى يا تراپوزايد

در این بخش، ایده استفاده از مهاربند سهبخشی یا تراپوزاید مورد بررسی قرار می گیرد. هدف از این پیکربندی، تسهیل عملیات مقاومسازی، افزایش انعطاف پذیری در طراحی و تعیین نحوه رفتار گسیختگی و امکان تعبیه بخشهای تعویض پذیر است. در شکل ۷ هندسه مهاربند توسعه داده شده، نشان داده شده است. این مهاربند در مقایسه با مهاربند هلالی شکل به علت کاهش طول ناحیه شیبدار، با خروج از مرکزیت یکسان، زاویه انتهایی (θ_0) بیشتری دارد. باتوجه به آنکه سختشوندگی هندسی در زمانی رخ میدهد که تمام بخشهای مهاربند در یک راستا قرار گرفتهاند(هنگام به صفر رسیدن



شکل ۷. هندسه مهاربند تراپوزاید

Fig. 7. Geometry of the Trapezoid Brace



Fig. 8. Comparison of Hysteresis Curves of the Crescent-Shaped Brace and the Three-Part Brace

توضیحات بیان شده، مشاهده می شود که روند خرابی در مهاربند سه بخشی توسعه داده شده مشابه مهاربند دوبخشی است و در مجموع می توان نتیجه گرفت رفتار کلی دو مهاربند مشابه هم است.

۴- ۱- ارزیابی انعطاف پذیری طراحی

بهمنظور ارزیابی تأثیر طول ناحیه شیبدار و همچنین میزان خروج از مرکزیت در رفتار مهاربند هلالی شکل، نمونه ها توسعه داده شد و برای خروج از مرکزیت ۷ و ۱۰ درصد، و نسبت طول ناحیه شیبدار(L1) ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است مقادیر خروج از مرکزیت و نسبت ناحیه شیبدار دیگر به علت اختلاف قابل توجه در زاویه انتهایی و خروج از مرکزیت، سختی محوری مهاربند درگیر می شود)، افزایش زاویه انتهایی باعث می شود مهاربند مورد نظر دیرتر به ناحیه سخت شوندگی هندسی برسد و همچنین در صورت استفاده از این مهاربند به منظور مقاوم سازی سازه های ساخته شده، طراح می تواند با توجه به ابعاد سازه، زاویه انتهایی را به نحوی تعیین نماید که امکان اجرا فراهم با شد.

به منظور مقایسه اولیه رفتار مهاربند هلالی شکل معمولی و مهاربند توسعه داده شده، یک نمونه مهاربند تراپوزاید توسعه داده شد. مصالح و المانهای مدل سازی این مهاربند مشابه مدل صحت سنجی شده بوده و در مجموع از ۶ المان (دو المان در هر بخش) استفاده شده است. این تعداد المان از آن جهت انتخاب شد که در صورت وقوع پدیده کمانش در بخشهای مختلف (مخصوصاً بخش میانی)، اثرات آن در تحلیل دیده شود. در این نمونه خروج از مرکزیت ۲٪ و نسبت طول ناحیه شیب دار ((L_1) ۲۰٪ طول کلی در نظر گرفته شده است. مقادیر گفته شده به نحوی تعیین شد تا فولاد مصرفی مهاربند توزیع شود. لازم به ذکر است باتوجه به عدم وجود روابط حاکم بر رفتار مهاربند تراپوزاید، رفتار این مهاربند با استفاده از روشهای مختلف مورد بر مهاربند هرای گرفت و این مقادیر به علت رفتار مناسب تر نمونه و تشابه بیشتر بر سی قرار گرفت و این مقادیر به علت رفتار مناسب تر نمونه و تشابه بیشتر با مهاربند هلالی شکل انتخاب شد.

در شکل ۸ منحنی هیسترزیس دو نمونه نشان داده شده است. در مهاربند سهبخشی ابتدا تسلیم در بخش میانی رخ داد و سپس در بخشهای کناری مشاهده شد. با توجه به آنکه زاویه انتهایی مهاربند سهبخشی، کمی بیشتر از مهاربند دوبخشی است، سخت شوندگی هندسی در این نمونه کمی دیرتر رخ میدهد. به علت خروج از مرکزیت کمتر به نسبت مهاربند دوبخشی، سختی اولیه و مقاومت فشاری مهاربند افزایش یافته است. همچنین این افزایش سختی، موجب افزایش مقاومت کششی نهایی نمونه نیز شده است. باتوجه با



شکل ۹. منحنی نیرو-تغییرشکل یکطرفه مهاربند تراپوزاید با بررسی اثرات هندسه الف) رفتار کششی، ب) رفتار فشاری.

Fig. 9. Monotonic Force-Displacement Curve of the Trapezoid Brace with Geometry Effects Analysis: (a) Tensile Behavior, (b) Compressive Behavior

جدول ۲. میزان تغییر سختی و مقاومت فشاری مهاربندهای تراپوزاید با بررسی اثرات هندسه (٪)

 Table 2. Percentage Change in Stiffness and Compressive strength of Trapezoid Braces with Geometry Effects Analysis (%)

	ζ=7%			ζ=10%			
L1/L0	· <u>/</u> ····	<u>//</u> ۳۰	<u>/</u> ۴۰	/۲.	<u>//</u> ٣•	/۴.	
$K_{IN}/K_{IN-2sec}$	$+\gamma\lambda/\gamma$	$+\Delta S/\lambda$	$+9\gamma/1$	-٣۶/٩	-77/	-•/• ١	
Fc/Fc-2sec	+77/4	+74/0	+79/7	-Y/•	-۵/۸	-۲/۲	

نتایج، در این بخش مورد ارزیابی قرار نگرفت و ارائه نتایج به مدل های گفته شده محدود شد.

در شکل ۹ منحنی نیرو-تغییرشکل یکطرفه نمونهها نشان داده شده است. همچنین اختلاف سختی و مقاومت فشاری مهاربندهای سهبخشی در جدول ۲ با مهاربندهای دوبخشی مقایسه شده است. در بارگذاری کششی، در مجموع می توان گفت کاهش خروج از مرکزیت مهاربندها، موجب افزایش سختی اولیه مهاربند شده است. همچنین افزایش طول ناحیه شیبدار، موجب کاهش زاویه انتهایی و درنتیجه کاهش سختشوندگی هندسی شده است. در مدل با خروج از مرکزیت ۱۰٪، افزایش طول ناحیه شیبدار موجب نزدیک

شدن رفتار مهاربند تراپوزاید به مهاربند هلالی شکل شده است. در بارگذاری فشاری نیز کاهش خروج از مرکزیت موجب افزایش مقاومت فشاری مهاربند شده است. با افزایش طول ناحیه شیبدار، حداکثر مقاومت فشاری نمونهها افزایش پیدا کرده؛ اما افت مقاومت بیشتری رخداده است. علت این اتفاق، تقدم تسلیم خمشی بخش میانی، در مهاربند با ناحیه شیبدار بزرگتر است که بعد از آن تسلیم فشاری در سایر اجزای مهاربند رخ میدهد درحالی که با کاهش طول ناحیه شیبدار، از همان ابتدا تسلیم فشاری در بخش میانی رخ میدهد و مهاربند رفتار یکنواختتری را نشان میدهد. باتوجهبه نتایج کسب شده، میتوان نتیجه گرفت رفتار این مهاربند بهخوبی توسط مهندس طراح جدول ۳. نام مدلها با بررسی اثرات توزیع رفتار غیرخطی در بخش میانی مهاربند تراپوزاید

	بخش میانی		دار	بخش شيب	نام مدل	شماره مدل	
$J(\text{mm}^4)$	$A(\text{mm}^2)$	T(mm)	$J(\text{mm}^4)$	$A(mm^2)$	T(mm)		
٨٨۶٩٧/۴	871	۱۵	٨٨۶٩٧/۴	871	۱۵	T=15	١
۸ <i>۸</i> ۶۹۷/۴	871	۱۵	11222/16	۸۲۸	۲.	T1=20 & T2=15	۲
۸ <i>۸</i> ۶۹۷/۴	871	۱۵	147724/00	۱۰۳۵	۲۵	T1=25 & T2=15	٣
XX۶9V/۴	871	۱۵	7.595./51	1449	۳۵	T1=35 & T2=15	۴

 Table 3. Model Names with evaluation of Nonlinear Behavior Distribution in the Central Section of the Trapezoidal Brace

قابل کنترل بوده و انعطاف پذیری بالایی برای طراحی دارد.

۴– ۲– تمرکز رفتار غیرخطی در بخش میانی

در این مهاربند می توان با افزایش صلبیت بخشهای مختلف، خرابی را در بخشهای مختلف متمرکز کرد. متمرکز نمودن خرابی در بخش میانی، ضمن کاهش طول ناحیه آسیب پذیر، از نظر اجرایی شرایط مناسب تری را برای تعویض بخشهای آسیب دیده فراهم می کند.

بهمنظور بررسی این پیکربندی، مدلها در سه گروه با طول ناحیه میانی متفاوت توسعه پیدا کرد. در گروه اول طول بخش شیبدار به ترتیب به میزان ۳۰٪ طول کلی در نظر گرفته شد. به منظور استفاده از پروتکل بارگذاری چرخهای، خروج از مرکزیت این مدل برابر با ۸٪ طول کلی قرار داده شد تا زاویه انتهایی مدلهای توسعه داده شده، با مدل آزمایشگاهی تقریبا یکسان باشد. مدلها با تفاوت ضخامت بخشهای مختلف به منظور ارزیابی رفتار مهاربند، مطابق جدول ۳ توسعه داده شد. در مدل شماره ۱، ضخامت تمامی بخشها ۱۵ میلیمتر در نظر گرفته شد تا مبنای مقایسه با سایر مدلها قرار بگیرد. در مدلهای شماره ۲ تا ۴ نیز به ترتیب ضخامت بخش شیبدار برابر با ۲۰، ۲۵ و ۳۵ در نظر گرفته شد تا اثر میزان صلبیت این بخش بر رفتار مهاربند ارزیابی شود. افزایش ضخامت بدین منظور انجام شد تا ضمن افزایش صلبیت بخشهای مختلف، ممان اینرسی و در نتیجه مقاومت خمشی این بخشها دچار تغییر قابل توجه نشود. این موضوع از أنجایی اهمیت پیدا می کند که مطابق روابط ۱ تا ۵، ممان اینرسی مقطع تاثیر قابل توجهی بر رفتار این مهاربند داشته و مقایسه رفتار مهاربندها با یکدیگر به خوبی فراهم نمى شود.

در شکل ۱۰ منحنی نیرو تغییرشکل مدلهای گروه اول، با طول

ناحیه شیبدار ۳۰٪ نشان داده شده است. با توجه به اینکه رفتار غیرخطی این مهاربند با تسلیم خمشی بخش میانی آغاز میشود، افزایش مساحت بخشهای کناری موجب تفاوت قابل توجه در رفتار فشاری این مهاربندها نشده است. با افزایش ضخامت بخشهای کناری، رفتار غیرخطی در این نواحی کاهش یافته و موجب افزایش کرنش در بخش میانی شده است به نحوی که در مدل با ضخامت ۳۵ میلیمتر در بخش شیبدار، هیچگونه رفتار غیرخطی در این ناحیه مشاهده نشد اما کرنش بخش میانی از سایر مدلها بیشتر بود. با این حال به علت طول قابل توجه بخش میانی، گسیختگی در این بخش رخ نداد. همچنین افزایش ضخامت این بخشها موجب افزایش مقاومت کششی مهاربند، بعد از مرحله سخت شدگی هندسی شده است که رفتاری مشابه مهاربندهای مرسوم دارد.

در گروه دوم، طول ناحیه شیبدار به میزان ۳۵٪ و خروج از مرکزیت مهاربند به میزان ۹٪ طول کلی در نظر گرفته شد و ضخامت بخشهای مخالف، مانند گروه اول در نظر گرفته شد. در شکل ۱۱ منحنی نیرو-تغییرشکل مدلهای گروه دوم نشان داده شده است. در این گروه نیز رفتار فشاری مهاربندها مشابه گروه اول است. با افزایش صلبیت بخش شیبدار، کرنشهای بخش میانی افزایش پیدا کرده و در نهایت در مدل با ضخامت بخش کناری ۳۵، در چرخه انتهایی گسیختگی در بخش میانی شروع شده است. در این مدل بخشهای کناری، رفتار الاستیک از خود نشان داده است.

در گروه سوم، طول ناحیه شیبدار به میزان ۴۰٪ و میزان خروج از مرکزیت مدلها ۹٪ طول کلی در نظر گرفته شد و ضخامت بخشهای مختلف مشابه گروههای قبلی در نظر گرفته شد. در شکل ۱۲ نتایج تحلیل رفتار فشاری و هیسترزیس این گروه آورده شده است. کاهش طول بخش تسلیم شونده موجب افزایش کرنش اعمال شده در این ناحیه و نتیجه



شکل ۱۰. منحنی نیرو-تغییرشکل مهاربند تراپوزاید با بررسی با طول ناحیه شیبدار ۳۰٪ و خروج از مرکزیت ۸٪ طول کلی. الف) رفتار هیسترزیس، ب) رفتار فشاری.

Fig. 10. Force-Displacement Curve of the Trapezoidal Brace with Analysis of 30% Inclined Region Length and 8% Eccentricity of the Total Length: (a) Hysteresis Behavior, (b) Compressive Behavior



شکل ۱۱. منحنی نیرو-تغییرشکل مهاربند تراپوزاید با بررسی با طول ناحیه شیبدار ۳۵٪ و خروج از مرکزیت ۹٪ طول کلی. الف) رفتار هیسترزیس، ب) رفتار فشاری.

Fig. 11. Force-Displacement Curve of the Trapezoidal Brace with Analysis of 35% Inclined Region Length and 9% Eccentricity of the Total Length: (a) Hysteresis Behavior, (b) Compressive Behavior



شکل ۱۲. منحنی نیرو-تغییرشکل مهاربند تراپوزاید با بررسی با طول ناحیه شیبدار ۴۰٪ و خروج از مرکزیت ۹٪ طول کلی. الف) رفتار هیسترزیس، ب) رفتار فشاری.

Fig. 12. Force-Displacement Curve of the Trapezoidal Brace with Analysis of 40% Inclined Region Length and 9% Eccentricity of the Total Length: (a) Hysteresis Behavior, (b) Compressive Behavior

شکل۱۲-الف بوده و مقاطع اعضای قاب مهاربندی در جدول ۴ ذکر شده است. بار مرده و زنده کف به ترتیب ۴/۸ و ۲/۴ کیلونیوتن بر مترمربع است. به جهت سادگی، به علت تقارن یک-چهارم سازه به صورت دو بعدی انجام شده است. جهت درنظرگیری اثرات پی-دلتا، یک ستون متکی به نمایندگی از سایر ستونهای تحت بار ثقلی قرار داده شد. مساحت و مماناینرسی این ستون برابر با مجموع مساحت و مماناینرسی سایر ستونهای گرانشی در مدل بوده و این ستون به وسیله المان خرپایی با سختی بسیار بالا به قاب اصلی متصل شده است.

جهت مدلسازی تمامی المانها از مصالح Steel02 استفاده شد. جهت مدلسازی تیرها و ستونها از المان dispBeamColumn و جهت مدلسازی مهاربندها از المان dispBeamColumn استفاده شده است. در این مدل برای مدلسازی ستونها از دو المان و جهت مدلسازی مهاربندها از چهار المان استفاده شد و جهت درنظرگیری اثرات کمانش، نقص اولیه به میزان یک هزارم طول مهاربند، در وسط مهاربندها در نظر گرفته شد. در تمامی المانها از ۵ نقطه انتگرالگیری استفاده شده است. جهت درنظرگیری مقاطع المانها نیز از مقاطع رشتهای یا فایبر استفاده شد. اتصالات مفصلی به صورت کاملاً مفصلی و اتصالات گیردار جهت سادگی، بهصورت صلب با استفاده از المان ZeroLength Element مدل مد. تکیهگاهها گسیختگی سریعتر مهاربندهای این گروه در مقایسه با گروههای قبلی می شود. در مدل با ضخامت بخش کناری ۲۵ میلی متر، در اواخر چرخه انتهایی گسیختگی رخ داده و در مدل با ضخامت ۳۵ میلی متر، به علت الاستیک ماندن بخش های کناری، گسیختگی بسیار زودتر از سایر نمونه ها آغاز شده است.

۵- بهبود رفتار قاب پشتیبانقوی با مهاربند هلالیشکل و تراپوزاید

قاب مهاربندی پشتیبان قوی شامل ناحیه ارتجاعی و ناحیه غیرارتجاعی است. ناحیه ارتجاعی به نحوی طراحی می شود تا رفتار الاستیک خود را حفظ نموده و ناحیه غیرارتجاعی وظیفه اتلاف انرژی را به عهده دارد. در این بخش امکان بهبود رفتار قاب پشتیبان قوی با اضافه نمودن مهاربندهای هلالی شکل و تراپوزاید مورد ارزیابی قرار می گیرد.

جهت مدلسازی تمامی نمونهها از نرمافزار OpenSees استفاده شد. قاب پشتیبان قوی ارائه شده در پژوهش لای و ماهین [۹] به عنوان نمونه مبنا قرار گرفت. مدل ارزیابی شده قاب مهاربندی پشتیبان قوی بوده که از مهاربندهای معمولی به عنوان مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی استفاده شده است. مدل ارائه شده یک ساختمان ۶ طبقه با کاربری اداری مطابق



شکل ۱۳. الف) پلان نمونههای قاب پشتیبانقوی بررسی شده[۹]، ب) تصویر شماتیک مدل عددی ارائه شده

Fig. 13. (a) Plan of the Strongback Frame Samples Studied, (b) Schematic Diagram of the Proposed Numerical Model

جدول ۴. مشخصات مقاطع اعضای دهانه مهاربندی[۹]

مهاربند ناحيه غيرخطى	قيد	مهاربند ناحيه الاستيك	تير	ستون	طبقه
HSS12x12x5/8	-	W14x132	W18x86	W14x342	١
HSS10x10x5/8	HSS12x12x5/8	HSS12x12x5/8	W18x86	W14x342	٢
HSS9x9x5/8	HSS12x12x5/8	HSS12x12x5/8	W18x86	W14x342	٣
HSS9x9x5/8	HSS8x8x1/2	HSS10x10x1/2	W18x86	W14x132	۴
HSS8x8x1/2	HSS8x8x1/2	HSS10x10x1/2	W18x86	W14x132	۵
HSS7x7x1/2	-	HSS8x8x1/2	W18x86	W14x132	۶

Table 4. Section Properties of the Bracing Span Members

۵- ۱- صحت سنجی قاب پشتیبان قوی

جهت صحتسنجی مدل عددی ارائه شده، نتایج تحلیل با نتایج مدل آزمایشگاهی قاب مهاربند فولادی دوطبقه لای و ماهین [۲۸] (شکل ۱۴) مقایسه شد(شکل ۱۵–الف). همچنین در ادامه نتایج مدل عددی قاب مهاربندی پشتیبانقوی پژوهش لای و ماهین [۹] و مدل این مطالعه مورد مقایسه قرار گرفت(شکل ۱۵–ب). نتایج صحتسنجی بیانگر تطابق مناسب نیز به صورت مفصلی مدل شده است. در شکل ۱۳–ب تصویر شماتیک مدل عددی نشان داده شده است. به منظور ارزیابی امکان گسیختگی در مهاربندها، از مصالح خستگی(Fatigue Material) استفاده شد. رفتار مصالح نیز مطابق جدول ۵ در نظر گرفته شد. در این جدول پارامتر m شیب منحنی کافین–مانسون در فضای لگاریتمی و ₀ ع مقدار کرنش گسیختگی در هر سیکل است. جدول ۵. پارامترهای مدلسازی مصالح تیر، ستون و مهاربند مدل عددی

Table 5. Modeling Parameters for the Materials of Beam, Column, and Brace in the Numerical Model

80	т	<i>a</i> 4	<i>a</i> ₃	<i>a</i> ₂	<i>a</i> 1	cR_2	cR_{I}	R_{θ}	b	E (Mpa)	F_y (Mpa)	پارامتر مدلسازی
٠/٠٩٩	-•/۴۵٨	١	•/•٢	١	•/•٣	•/١۵	./97۵	۱۸/۵	•/••٣	7	۳۱۰	مقدار



شکل ۱۴. مشخصات نمونه أزمایشگاهی لای و ماهین[۲۸]





شکل ۱۵.نتایج صحتسنجی تحلیل چرخهای نمونه الف) آزمایشگاهی، ب) عددی.

Fig. 15. Results of Cyclic Analysis Validation:, (a) Experimental, (b) Numerical

جدول ۶. نام مدلها با بررسی اثرات اضافه نمودن مهاربند دوبخشی و سهبخشی

توضيحات	نام مدل
مدل اصلي و ارائه شده توسط لاي و ماهين	SBS-Base
قاب پشتیبان قوی با مهاربند هلالیشکل دوبخشی	SBS-C2S
قاب پشتیبان قوی با مهاربند هلالی شکل دوبخشی دوگانه	SBS-2C2S
قاب پشتیبان قوی با مهاربند سه بخشی یا تراپوزاید	SBS-C3S

Table 6. Model Names with evaluation of the Effects of Adding Two-part and Three-part Braces



شکل ۱۶. تصویر شماتیک مدلها. الف) مدل SBS-Base، ب) مدل SBS-2C2S، پ) SBS-2C2S، ت) مدل SBS-C3S. Fig. 16. Schematic Diagram of the Models: (a) SBS-Base, (b) SBS-C2S, (c) SBS-2C2S, (d) SBS-C3S

میان نتایج مدلسازی عددی و مطالعات قبلی است.

۵- ۲- بررسی امکان استفاده از مهاربند هلالی شکل بهمنظور بهبود رفتار
 سیستم پشتیبان قوی

از مزایای مهاربند هلالی شکل می توان به قابلیت اتلاف انرژی در چرخههای اولیه و نیروی کم، و قابلیت تغییر شکل زیاد و رفتار مناسب در زلزلههای بزرگ اشاره کرد. استفاده از این ویژگی به منظور مقاوم سازی سیستم مهاربند همگرای مرسوم می تواند به بهبود رفتار سازه کمک کرده و موجب بهبود رفتار و همچنین قابلیت شکل پذیری بیشتر در این سیستم سازهای شود.

در شکل ۱۶ هندسه مدلها و درجدول ۶ نام مدلها به همراه توضيحات

آنها ارائه شده است. به منظور ارزیابی اضافه نمودن مهاربند هلالی شکل به قاب ستون فقراتی، مدل SBS-Base به عنوان مدل مرجع قرار گرفت و مهاربندهای دوبخشی و سهبخشی در ناحیه غیرارتجاعی به آن اضافه شد. به منظور مدل سازی مهاربندهای هلالی شکل از دو المان و از شش المان برای برای مدل سازی مهاربند هلالی شکل سه بخشی استفاده شد. این مقادیر برای مدل سازی مهاربند هلالی شکل سه بخشی استفاده شد. این مقادیر به نحوه توسعه یافت تا مشکل همگرایی در فرآیند تحلیل به وجود نیاید. در مدل های دارای مهاربندی هلالی شکل دوبخشی از خروج از مرکزیت ۱۰۸٪ و در مدل دارای مهاربند هلالی شکل سه بخشی از خروج از مرکزیت ۱۰۸٪ و طول ناحیه شیبدار ۳۰٪ استفاده شد. این مقادیر به نحوی در نظر گرفته شد تا سختی اولیه سازه به شکل قابل توجهی افزایش پیدا نکرده و مهاربندهای هلالی شکل، همزمان با مهاربندهای اصلی به اوج مقاومت خود جدول ۷. تغییرمکانهای سقف در نظر گرفته شده مطابق مدل عددی لای و ماهین[۹]

Table 7. Roof Displacements Considered According to the Numerical Model of Lai and Mahin

شماره ترتيب	١	٢	٣	۴	۵	۶	۷
تعداد چرخه	٢	٢	۲	۲	٢	٢	۲
جابهجایی نسبی سقف هدف (٪)	$\pm \cdot / r$	$\pm \cdot / \Delta$	$\pm 1/.$	$\pm \Upsilon/ \cdot$	$\pm r/\cdot$	\pm F /·	$\pm \Delta / \cdot$

جدول ۸. حداکثر برش پایه و دوره تناوب مود اول و دوم

Table 8. Maximum Base Shear and First and Second Mode Periods

اوب سازه (Sec)	دوره تن	حداكثر برش پايه	نام مدل
مود دوم	مود اول	(KN)	
٠/٢۴٩	•/774	۵۳۷۲	SBS-Base
•/٢٣٣	• /۶٨۶	8.47	SBS-C2S
•/۲۲٨	• /878	٨٦٣٣	SBS-2C2S
•/٢٣٢	• /۶٨٣	5774	SBS-C3S

نرسند. همچنین اعضای خرپا الاستیک به نحوی تغییر یافت تا عملکرد الاستیک خود را حفظ نماید.

در تمامی مدل ها، به علت جلوگیری از رفتار نامناسب سازه، از مهاربندهای غیرارتجاعی همان طبقه بهعنوان مقطع مهاربندهای هلالی شکل و تراپوزاید استفاده شد تا سختی و سطح مقطع مهاربندهای هلالی شکل، متناسب با مهاربند بکار رفته در همان طبقه باشد. همچنین از مصالح و المانهای استفاده شده در مدل سازی مهاربندهای معمولی، بهمنظور مدل سازی مهاربندهای هلالی شکل و تراپوزاید استفاده شد. لازم به ذکر است مشخصات غیرخطی استفاده شده در مدل سازی ها، بهمنظور ارزیابی رفتار محوری در مهاربندهای باتوجهبه هندسه خاص آنها توسعه داده شده است درحالی که مهاربندهای انگر خمشی قرار می گیرند. مطابق صحت سنجی انجام شده، میتوان انتظار داشت رفتار کلی این مهاربندها مشابه مدل سازی های صورت گرفته باشد؛ اما بررسی گسیختگی این مهاربندها و توسعه مصالح و المانهای مدل سازی بهمنظور ارزیابی دقیق رفتار این مهاربند، میتواند در آینده مورد بررسی پژوهشگران قرار بگیرد. پروتکل بارگذاری چرخهای مطابق جدول ۷ در نظر گرفته شد.

۵- ۲- ۱- نتایج تحلیل چرخهای

در شکل ۱۷ منحنی هیسترزیس و در جدول ۸ حداکثر برش پایه و دوره تناوب مود اول و دوم سازه نشان داده شده است.

مدل پایه (SBS-Base) در اواخر چرخه نهم، بعد از گسیختگی تمام مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی با ناپایداری مواجه شد و تحلیل به اتمام رسید. اضافه کردن مهاربندی دوبخشی (مدل SBS-C2S) موجب افزایش ۲۰۱٪ حداکثر برش قابل تحمل، افزایش ۱۰٪ سختی اولیه سازه نسبت به مدل پایه (SBS-Base) شده است. این تغییر موجب شده تا در انتهای چرخه نهم، ۳۵٪ جذب انرژی نسبت به مدل پایه افزایش یابد. بعد از گسیختگی کامل مهاربندهای اصلی در دریفت ۳٪، مهاربندهای هلالی شکل به مقاومت کامل مهاربندهای اصلی در دریفت ۳٪، مهاربندهای هلالی شکل به مقاومت مقاومت سازه در چرخه های انتهایی تقریبا معادل نصف حداکثر برش پایه مدل پایه است. لازم به ذکر است هیچکدام از مهاربندهای هلالی شکل در این تحلیل دچار گسیختگی نشده و تا انتهای تحلیل عملکرد خود را حفظ این تحلیل دچار گسیختگی نشده و تا انتهای تحلیل عملکرد خود را حفظ

اضافه کردن مهاربندی سه بخشی (مدل SBS-C3S) موجب افزایش





Fig. 17. Hysteresis Curves of the Models: (a) Separately, (b) Together

جذب انرژی نسبت به مدل پایه در چرخه نهم) را نشان میدهد. در این مدل نیز مهاربندها در بعد از خرابی مهاربندهای اصلی به اوج مقاومت خود میرسند اما با این، وجود افت مقاومت قابل توجهی در این بخش مشاهده میشود که بیانگر خرابی مهاربندهای هلالی شکل است. علت این اتفاق، تجمع رفتار غیرخطی در ناحیه میانی، به علت مقاومت خمشی پایین مهاربند طبقات دوم ۱۳٪ حداکثر برش قابل تحمل، افزایش ۱۰/۹٪ سختی اولیه سازه و کاهش قابل توجه دوره تناوب سازه نسبت به مدل پایه (SBS-Base) شده است. در این مدل به علت خروج از مرکزیت کمتر در مقایسه با مدل دارای مهاربند دوبخشی، سختی و برش پایه سازه افزایش بیشتری داشته و در چرخههای اولیه به علت مقاومت فشاری بالاتر، جذب انرژی بیشتری (۴۱٪ افزایش

(الف)

(ب)



شکل ۱۸. حداکثر نیروی ایجاد شده در مدلهای دارای مهاربند دوبخشی و سهبخشی در: الف) قیدها (طبقات دوم تا پنجم)، ب) مهاربندهای ارتجاعی، ج) ستون متصل به خرپا الاستیک

Fig. 18. Maximum Force Generated in the Models with Two-part and Three-part Braces in: ,(a) Tiess (Second to Fifth Stories) ,(b) Elastic Braces, (c) Column Connected to the Elastic Truss

تا ششم (دارای مقطع قوطی) است. در مجموع استفاده از مهاربند تراپوزاید موجب افزایش ۸/۱۳۴٪ میزان جذب انرژی نسبت به مدل پایه شده است. اضافه کردن مهاربندی دوبخشی دوگانه (مدل SBS-2C2S) موجب افزایش ۵۷٪ حداکثر برش قابل تحمل سازه و افزایش ۱۳/۷٪ سختی اولیه سازه نسبت به مدل پایه (SBS-Base) شده است. این مدل در مقایسه به مدل های قبلی، جذب انرژی مناسبتر با رفتار تقریبا متقارن در کشش و فشار را در چرخههای اولیه از خود نشان داده است که از دلایل آن میتوان به افزایش قابل توجه مقاومت فشاری و کششی مهاربندهای هلالی شکل، به علت استفاده دوگانه آنها اشاره کرد. این مدل تا چرخه نهم ۱۵۰٪ افزایش جذب انرژی را نسبت به مدل پایه نشان داده است. همچنین این مهاربند بعد پایه را نشان میدهد که به علت دو برابر بودن مهاربندهای استفاده شده و افزایش مقاومت فشاری متناسب با این ساختار است. میزان جذب انرژی کلی افزایش مقاومت فشاری متناسب با این ساختار است. میزان جذب انرژی کلی این مدل در مقایسه با مدل پایه، ۴۲۰/۹٪ درصد افزایش داشته است.

۵- ۲- ۲- نیروی ایجاد در اعضای خرپا الاستیک

در شکل ۱۸ حداکثر نیروی ایجاد شده در اعضای خرپا الاستیک نشان داده شده است. استفاده از مهاربند دوبخشی(مدل SBS-C2S)، در قیدها موجب کاهش نیرو به میزان ۱۶ و ۲۰ درصد در طبقات دوم و سوم، و

افزایش ۹ و ۲ درصدی در طبقات چهارم و پنجم در مقایسه با مدل پایه شده است. از دلایل کاهش نیروی در طبقات دوم و سوم، میتوان سختی بیشتر طبقات اول تا سوم، در مقایسه با سایر طبقات اشاره کرد. با توجه به اینکه مهاربندهای هلالیشکل مقطع مشابه به مهاربند همان طبقه دارند، و از طرفی سختی مهاربندهای طبقات اول تا سوم بیشتر از سایر طبقات است، در نتیجه سختی طبقات پایین بیشتر است و نرمی بیشتر طبقات است، موجب ایجاد نیروی بیشتری در قیدها ایجاد شده است. نیروی ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی نیز به ترتیب از طبقات اول تا پنجم به میزان ۲۶، است. همچنین نیروهای ایجاد شده در ستون متصل به خرپا الاستیک نیز است. همچنین نیروهای ایجاد شده در ستون متصل به خرپا الاستیک نیز نیری است. از طبقه اول تا پنجم به میزان ۲۶٪ افزایش داشته و در طبقه آخر تغییری نیری است. همچنین نیروهای ایجاد شده در ستون متصل به خرپا الاستیک نیز و در نتیجه اعمال نیروی بیشتر از سمت مهاربندهای غیرارتجاعی به خرپا الاستیک اشاره کرد.

استفاده از مهاربند سهبخشی (مدل SBS-C3S)، در قیدها موجب کاهش نیرو به میزان ۲ درصد در طبقات دوم و سوم، و افزایش ۲۳ درصد در طبقات چهارم و پنجم در مقایسه با مدل پایه شده است. این مهاربند نیز رفتار تقریبا مشابهی به مدل قبلی داشته و به علت سختی بیشتر مهاربندهای هلالی شکل، نیروی بیشتری به خرپا الاستیک اعمال شده است. نیروی ایجاد

شده در مهاربندهای ارتجاعی نیز به ترتیب از طبقات اول تا ششم به میزان ۳۴، ۳۲، ۴۰، ۳۸، ۴۳ و ۳۳ درصد افزایش داشته است. همچنین نیروهای ایجاد شده در ستون متصل به خرپا الاستیک در طبقات اول تا چهارم به میزان ۳۰٪ و در طبقات پنجم و ششم به ترتیب ۱۷ و ۲۱ درصد افزایش داشته است. از دلایل این افزایش نیرو نسبت به مدل قبل، میتوان به افزایش برش پایه سازه و در نتیجه اعمال نیروی بیشتر از سمت مهاربندهای غیرارتجاعی به خرپا الاستیک اشاره کرد.

استفاده از مهاربند دوبخشی دوگانه (مدل SBS-2C2S)، در قیدها از طبقه دوم تا پنجم به ترتیب موجب افزایش نیروی ۳۳، ۴۸، ۲۳ و ۲۳ درصدی نیرو در مقایسه به مدل پایه شده است. این افزایش نیرو به علت رفتار این مدل بعد از خرابی مهاربندهای اصلی، و در زمان کشش حداکثر مهاربندهای هلالی شکل شکل گرفته است و از آنجایی که با افزایش طبقات، سطح مقطع مهاربندها کاهش پیدا میکند، نیروی ایجاد شده در قیدها نیز کاهش پیدا کرده است. نیروی ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی نیز به ترتیب از طبقات اول تا ششم به میزان ۵۵، ۵۱، ۷۰، ۵۵، ۸۰ و ۳۳ درصد افزایش داشته است. نیروهای ایجاد شده در ستون نیز به ترتیب ۳۵، ۵۷، ۸۶، ۵۸، ۲۲ و ۳۳ درصد افزایش داشته است.

۶- نتیجهگیری

قاب مهاربندی پشتیبانقوی با مهاربند فولادی مرسوم، شکلپذیری و قابلیت اتلاف انرژی مناسبی ندارد. در این پژوهش ضمن معرفی پیکربندی جدید مهاربند هلالی شکل به منظور انعطاف پذیری بیشتر در طراحی، امکان بهبود رفتار چرخهای مهاربند فولادی با اضافه کردن مهاربند هلالی شکل مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه نتایج به دست آمده به صورت خلاصه بیان شده است:

- رفتار مهاربند سهبخشی یا تراپوزاید بهخوبی توسط مهندس طراح، بهوسیله تغییر پارامترهای اساسی از جمله میزان خروج از مرکزیت و طول ناحیه شیبدار قابلتعریف بوده و انعطاف پذیری مناسبتری را برای طراح فراهم میآورد. همچنین ویژگیهای رفتار این مهاربند از جمله سختی و سختشوندگی هندسی، متناسب با روابط ارائه شده برای مهاربند هلالی شکل دوبخشی بوده و میتوان با مطالعه این روابط، رفتار مهاربند را تنظیم نمود.
- کاهش طول ناحیه غیرخطی در مهاربندهای تراپوزاید، موجب شده تا گسیختگی در مهاربندها زودتر رخداده و که نیاز به توسعه این مهاربند

با اضافه کردن المان جاذب انرژی و یا جایگزینی آن با بخش میانی، این رفتار بهبود پیدا کند.

- اضافه کردن مهاربند هلالی شکل و تراپوزاید به سیستم مهاربند پشتیبان قوی تماماً فولادی، سختی اولیه سازه را به میزان قابل توجه افزایش نداده (بین ۱۰ تا ۱۴ درصد) و با افزایش جذب انرژی تا میزان ۴۴۰/۹٪، رفتار مطلوبی را از خود نشان داده است.
- مهاربند تراپوزاید در مقایسه با مهاربند هلالی شکل دوبخشی، به علت توزیع رفتار غیرخطی در ناحیه کوچکتر، زودتر دچار گسیختگی شده است. بهمنظور بهبود شکلپذیری مهاربندهای تراپوزاید، میتوان با استفاده از مهاربند با مقطع I شکل، ظرفیت خمشی مقطع را بالا برده تا ناحیه میانی که تحتتأثیر خمش و نیروی محوری است، دیرتر دچار خرابی شده و خرابی در سطح مهاربند توزیع شود.
- استفاده از مهاربند دوبخشی دوگانه، بهبود رفتار قابل توجهی را نشان داده
 است که این موضوع، به علت بهبود رفتار فشاری مجموع دو مهاربند، در
 مقایسه با استفاده از یک مهاربند است.
- استفاده از مهاربند هلالی شکل یا تراپوزاید، باتوجه به اختلاف قابل توجه در مقاومت فشاری و کششی، موجب ایجاد لنگر قابل توجه در خرپا الاستیک شده است. استفاده از یک مهاربند هلالی شکل یا تراپوزاید در هر طبقه موجب افزایش نیرو تا ۴۰ درصد و استفاده از مهاربند هلالی شکل دوگانه تا ۸۰٪ در المانها، افزایش نیرو داشته است که سهم مهاربندهای ارتجاعی و ستون در تحمل این نیرو، بیشتر از قیدها است.

منابع

- C.-H. Chen, Performance-based seismic demand assessment of concentrically braced steel frame buildings, University of California, Berkeley, 2010.
- [2] S. Kiggins, C.-M. Uang, Reducing residual drift of buckling-restrained braced frames as a dual system, Engineering Structures, 28(11) (2006) 1525-1532.
- [3] R. Tremblay, L. Tirca, Behaviour and design of multistorey zipper concentrically braced steel frames for the mitigation of soft-storey response, in: STESSA 2003-Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, Routledge, 2018, pp. 471-477.
- [4] A. Martin, G.G. Deierlein, Generalized modified modal superposition procedure for seismic design of rocking and

487.

- [15] D.R. Sahoo, T. Singhal, S.S. Taraithia, A. Saini, Cyclic behavior of shear-and-flexural yielding metallic dampers, Journal of Constructional Steel Research, 114 (2015) 247-257.
- [16] S.A. Mohebi, S. M. Zahrai, R. Raoufi, Seismic evaluation of steel structures retrofitted with supplemental elliptical damper, Amirkabir J. Civil Eng., 55(8) (2023) 1677-1700 (in Persian).
- [17] Gh. Pachideh, M. Gholhaki, M. A. Kafi, Experimental and Numerical Evaluation of an Innovative Diamond-Scheme Bracing System Equipped with a Yielding Damper, Amirkabir J. Civil Eng., 53(11) (2022) 4557-4576(in Persian).
- [18] B.G. Simpson, S.A. Mahin, Experimental and Numerical Investigation of Strongback Braced Frame System to Mitigate Weak Story Behavior, Journal of Structural Engineering, 144(2) (2018) 04017211.
- [19] A. Soleymani, H. Saffari, A novel hybrid strong-back system to improve the seismic performance of steel braced frames, Journal of Building Engineering, 84 (2024) 108482.
- [20] T. Trombetti, S. Silvestri, G. Gasparini, I. Ricci, Stiffnessstrength-ductility-design approaches for crescent shaped braces, The Open Construction & Building Technology Journal, 3(1) (2009).
- [21] M. Palermo, L. Pieraccini, A. Dib, S. Silvestri, T. Trombetti, Experimental tests on Crescent Shaped Braces hysteretic devices, Engineering Structures, 144 (2017) 185-200.
- [22] E. Mokhtari, V. Laghi, M. Palermo, S. Silvestri, Quasistatic cyclic tests on a half-scaled two-storey steel frame equipped with Crescent Shaped Braces, Engineering Structures, 232 (2021) 111836.
- [23] E. Mokhtari, M. Palermo, V. Laghi, A. Incerti, C. Mazzotti, S. Silvestri, Quasi-static cyclic tests on a halfscaled two-storey steel frame equipped with Crescent Shaped Braces at both storeys: Experimental vs. numerical response, Journal of Building Engineering, 62 (2022) 105371.

pivoting steel spine systems, Journal of Constructional Steel Research, 183 (2021) 106745.

- [5] L. Wiebe, C. Christopoulos, R. Tremblay, M. Leclerc, Mechanisms to limit higher mode effects in a controlled rocking steel frame. 1: Concept, modelling, and lowamplitude shake table testing, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 42(7) (2013) 1053-1068.
- [6] B. Qu, F. Sanchez-Zamora, M. Pollino, Transforming Seismic Performance of Deficient Steel Concentrically Braced Frames through Implementation of Rocking Cores, Journal of Structural Engineering, 141(5) (2015) 04014139.
- [7] F.C. Blebo, D.A. Roke, Seismic-resistant self-centering rocking core system, Engineering Structures, 101 (2015) 193-204.
- [8] T. Takeuchi, X. Chen, R. Matsui, Seismic performance of controlled spine frames with energy-dissipating members, Journal of Constructional Steel Research, 114 (2015) 51-65.
- [9] J.-W. Lai, S.A. Mahin, Strongback System: A Way to Reduce Damage Concentration in Steel-Braced Frames, Journal of Structural Engineering, 141(9) (2015) 04014223.
- [10] B.G. Simpson, Higher-mode force response in multistory strongback--braced frames, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 49(14) (2020) 1406-1427.
- [11] B.G. Simpson, D. Rivera Torres, Simplified modal pushover analysis to estimate first-and higher-mode force demands for design of strongback-braced frames, Journal of Structural Engineering, 147(12) (2021) 04021196.
- [12] M.S. Faramarzi, T. Taghikhany, Direct performancebased seismic design of strongback steel braced systems, in: Structures, Elsevier, 2020, pp. 482-495.
- [13] M.S. Faramarzi, T. Taghikhany, A comparative performance-based seismic assessment of strongback steel braced frames, Journal of Building Engineering, 44 (2021) 102983.
- [14] M.D. Symans, M.C. Constantinou, Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-ofthe-art review, Engineering Structures, 21(6) (1999) 469-

Crescent shaped braces for the seismic design of building structures, Materials and Structures, 48 (2015) 1485-1502.

- [27] S. Mazzoni, OpenSees command language manual, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, (2006).
- [28] J.-W. Lai, Experimental and analytical studies on the seismic behavior of conventional and hybrid braced frames, UC Berkeley, 2012.
- [24] M. Palermo, I. Ricci, S. Gagliardi, S. Silvestri, T. Trombetti, G. Gasparini, Multi-performance seismic design through an enhanced first-storey isolation system, Engineering Structures, 59 (2014) 495-506.
- [25] M. Palermo, V. Laghi, G. Gasparini, S. Silvestri, T. Trombetti, Analytical estimation of the key performance points of the tensile force-displacement response of Crescent Shaped Braces, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 148 (2021) 106839.
- [26] M. Palermo, S. Silvestri, G. Gasparini, T. Trombetti,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم A. Fatahzadeh, A. Biglarifadafan, Evaluation of the Effect of Two-Part and Three-Part Braces on the Seismic Behavior of Strongback Braced Frames , Amirkabir J. Civil Eng., 57(3) (2025) 445-468.



DOI: <u>10.22060/ceej.2025.23688.8197</u>