

Evaluation of the Performance of Rocking Wall with Eccentrically Braced Frame with Vertical Link Based on the Force Design Method

Mehrdad Dorj¹, Mohammad Gholami²*, Amirhosein Parvizi³

¹ Department of Civil Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.

² Department of Civil Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

³ Department of Civil Engineering, ShQ.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

ABSTRACT: This study introduces a combined system of Rocking Shear Walls with Eccentrically Braced Frame with Vertical Link (RCSW-EBF). The aim of the study is to investigate the impact of the Force Design parameter (with different beta values) on the behavior of the RCSW-EBF system while keeping the cable area constant. Additionally, the study seeks to explore the effects of cable area on the behavior of the RCSW-EBF system while other characteristics remain unchanged. The 10-story frames are designed in SAP software, and the dimensions of the system sections are determined. These 10-story frames are then modeled in ABAQUS software, and their nonlinear behavior under pushover and cyclic analysis is determined. The finite element modeling has been done with Shell and Wire elements. The results of the cyclic analysis indicate that an increase in the percentage of Brace force (x%) leads to a corresponding increase in wasted energy and the coefficient of energy loss and reducing the design force of the Eccentrically Braced Frame's span and increasing the design force of the Rocking Wall with Concentrically Braced Frames' span led to a decrease in the cyclic diagrams of energy consumption. So, the energy consumption of the RCSW-EBF frame with the design forces of Braced Frame 70% and Rocking wall 30%, Braced frame 80% and Rocking wall 20%, and Braced Frame 90% and Rocking Wall 10% is respectively 12%, 28% and 44% more than the system with the design force of Braced Frame 60% and Rocking Wall 40%.

Review History:

Received: Jul. 26, 2025

Revised: Oct. 02, 2025

Accepted: Nov. 06, 2025

Available Online: Dec. 01, 2025

Keywords:

Brace Frame

Vertical Link

Rocking Wall

Self-Centering Reparability

Force Based Design

1- Introduction

In recent years, due to the high vulnerability of buildings designed according to Standard 2800 when subjected to design-level earthquakes and even milder events, the idea of directing damage toward specific, replaceable elements in the structure was introduced. This concept aims to reduce repair cost and time, thereby enabling faster re-occupancy [1].

On the other hand, the rocking phenomenon caused by overturning moment exceeding gravity moment's reason, the use of rocking shear walls with post-tensioned cables has been proposed as an effective method for reducing nonlinear behavior and enhancing re-centering capability [2]. In addition, V-EBF bracing systems have attracted attention because of their favorable energy dissipation capacity. Early studies by C-K and colleagues demonstrated the stable hysteretic behavior of this system [3], and Wakabayashi showed that V-EBF is more stable than the inverted-V bracing system [4]. Analytical results by Dosika and collaborators also showed good agreement with experimental shear capacity and confirmed yielding of the web of the link beam [5]. Investigations by Zehraei et al. [6] further

indicated the desirable energy absorption performance of the system and response modification factors greater than code-specified values [7]. Combining concentrically braced frames with steel panels also led to confining damage within the damper and facilitating its replacement, and subsequent studies confirmed appropriate distribution of plastic hinges and convergence of analytical and experimental results [8].

Considering the limitations of connections in post-tensioned moment frames and the significant residual deformation in eccentrically braced frames, this study for the first time introduces a hybrid system composed of an eccentrically braced frame with a vertical link and a self-centering rocking steel wall equipped with post-tensioned cables. The system is investigated under cyclic loading to ensure that energy dissipation is provided by the vertical link while re-centering capability is supplied by the rocking wall, and to identify its advantages and drawbacks.

2- Methodology

2- 1- Proposed System Mechanism

The behavioral mechanism of the proposed EBF-RCSW

*Corresponding author's email: m.gholami@yu.ac.ir

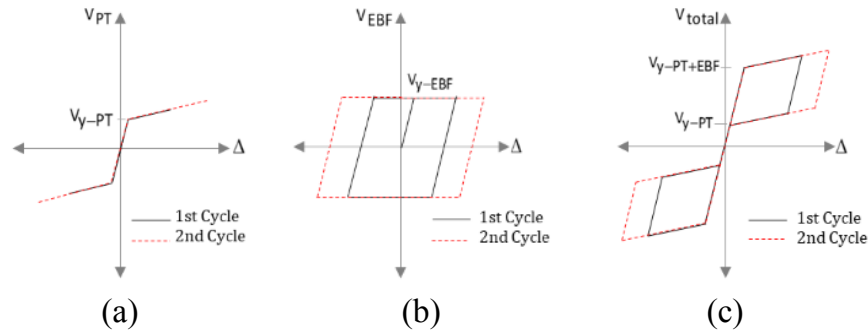


Fig. 1. PSchematic force–displacement diagram: (a) Self-centering rocking shear wall, (b) Eccentrically braced frame with a vertical shear link, and (c) Proposed hybrid EBF-RCS system.

system is based on the concept that the eccentrically braced frame with a vertical shear link is responsible for energy dissipation, while the rocking steel shear wall equipped with post-tensioned cables provides self-centering and restores the system to its original position. According to the schematic diagrams in Fig. 1, the base-shear contribution of the rocking wall, the eccentrically braced frame, and the overall hybrid system are defined separately. In this context, the parameter α represents the ratio of secondary stiffness to initial stiffness, and the parameter β indicates the degree of self-centering capability of the system.

2- 2- Finite Element Model and Validation

For validation, the experimental model of Qureshi et al. [8], consisting of a rocking shear wall with two post-tensioned cables and a reinforcing bar connecting the wall to the foundation, was re-modeled in ABAQUS. In the modeling process, S4R shell elements were used for the steel wall panel, and T3D2 truss elements were used for the cables. The analysis was conducted in two steps: an initial thermal loading to induce post-tensioning force, followed by dynamic time-history loading. The numerical results showed excellent agreement with the experimental data, with the maximum relative error reported to be less than 4%. Stress distribution results indicated that the highest stress concentrations occur at the cable anchorage region at the top of the wall and at the compression toe region at the bottom, which represent the most likely failure zones.

3- Discussion and Results

In this study, the modeling of the hybrid system consisting of an eccentrically braced frame with a vertical link and a rocking shear wall was carried out using A416 and A992 steel grades and assuming bilinear kinematic behavior. Eight ten-story models with various force-distribution ratios between the frame and the wall, as well as models with different post-tensioning cable areas, were analyzed. The components were modeled using appropriate elements and examined under cyclic quasi-static loading and pushover analysis. The design was performed such that only the vertical link would yield at a drift of two percent, while all other members remained within the elastic range. Mesh density was chosen optimally,

and secondary three-dimensional effects were neglected. In comparing the numerical models, the cyclic behavior of the proposed EBF-RCSW system was analyzed by varying the percentage of force distribution between the eccentrically braced frame and the rocking shear wall, as well as by changing the cross-sectional area of the post-tensioned cables. This was done to identify the influence of each parameter on self-centering capability, secondary stiffness, and energy dissipation. The results showed that increasing the portion of design force assigned to the rocking wall leads to narrower and more flag-shaped hysteresis loops, thereby improving self-centering ability; however, energy dissipation decreases simultaneously. Specifically, the frames with Brace 70% & Rocking 30%, 80% & 20%, and 90% & 10% dissipated 12%, 28%, and 44% more energy, respectively, compared to the Brace 60% & Rocking 40% configuration. In contrast, increasing the cable area without altering the design force significantly increased the secondary stiffness and ultimate strength, while having little effect on self-centering capability. This finding was confirmed through the cyclic curves and stress distributions. Analysis of energy dissipation, presented in Fig. 2, indicated that increasing the force share of the eccentrically braced frame results in substantial growth in energy dissipation (E_p and E_D) and cumulative dissipated energy, whereas changing the cable area has negligible influence.

This is because energy dissipation is governed by the vertical link, and the design force of the frame was kept constant across the cable models. Compared with similar systems reported in previous studies, the hysteresis loops of the present model exhibit a more pronounced flag shape with a larger enclosed area, reflecting a successful combination of self-centering and energy dissipation.

4- Conclusions

The aim of this study was to develop and evaluate a novel hybrid system composed of an eccentrically braced frame with a vertical shear link and a rocking shear wall, capable of simultaneously providing high seismic self-centering and significant energy dissipation. The performance of this system was assessed through the analysis of four ten-story models, focusing on the influence of two key parameters the

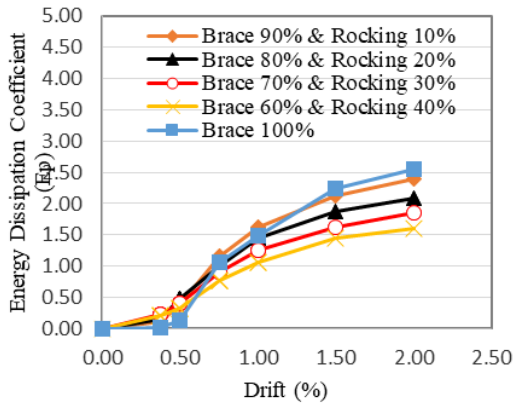


Fig. 2. Energy dissipation coefficient (EP) of the models with varying force distribution.

distribution of design force and the cross-sectional area of the post-tensioned cables on its cyclic behavior. The results indicated that increasing the rocking wall's share of the base shear enhances self-centering capability, reduces residual drift, and produces a stable flag-shaped hysteresis response. Conversely, increasing the cable area leads to higher secondary stiffness and greater ultimate capacity, while having limited impact on self-centering performance. The analyses also showed that the proposed system exhibits a more ideal flag-shaped hysteresis curve compared to similar systems reported in previous studies, effectively addressing the shortcomings observed in earlier research. Overall, the hybrid system can serve as an efficient and effective option for seismic design in earthquake-prone regions, offering a balanced combination of cyclic stability, high energy dissipation, and desirable self-centering capability.

References

- [1] M.G. Vetr, A. Ghamari, J. Bouwkamp, Investigating the nonlinear behavior of Eccentrically Braced Frame with vertical shear links (V-EBF), *Journal of Building Engineering*, 10 (2017) 47–59.
- [2] M. Midorikawa, T. Azuhata, T. Ishihara, A. Wada, Shaking table tests on seismic response of steel braced frames with column uplift, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35(14) (2006) 1767–1785.
- [3] M. Shayanfar, M. Barkhordari, A. Rezaeian, Experimental study of cyclic behavior of composite vertical shear link in eccentrically braced frames, *Steel & Composite Structures*, 12(1) (2012) 13–29.
- [4] P. Dusicka, A.M. Itani, I.G. Buckle, Evaluation of conventional and specialty steels in shear link hysteretic energy dissipators, in: *Proc., 13th World Conf. on Earthquake Engineering*, 2004.
- [5] S.M. Zahrai, A. Moslehitabar, *Cyclic behaviour of steel braced frames having shear panel system*, (2006).
- [6] S.M. Zahrai, Y. Laboratory investigation of the application of vertical beam in improving the seismic performance of steel buildings, *Journal of Civil Engineering and Surveying, Faculty of Engineering*, Volume 44, Number 3, Pages 379-393 (In Persian) (2009).
- [7] M. Khazaei-Poul, F. Nateghi-Alahi, E. Alavi, Seismic behaviour of concentrically braced frame system combined with steel shear panel, in: *Proceedings of the 9th International Congress on Civil Engineering*, Isfahan University of Technology Isfahan, 2012.
- [8] I.M. Qureshi, P. Warnitchai, Computer modeling of dynamic behavior of rocking wall structures including the impact-related effects, *Advances in Structural Engineering*, 19(8) (2016) 1245–1261.



بررسی عملکرد دیوار برشی گهواره‌ای با قاب مهاربندی واگرا لینک قائم برشی به روش طراحی بر اساس نیرو

مهرداد درج^۱، محمد غلامی^{۲*}، امیرحسین پرویزی^۳

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران.

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

۳- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد، واحد شهر قدس، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰

کلمات کلیدی:

قاب مهاربندی واگرا

لینک قائم برشی

دیوار برشی گهواره‌ای

برگشت‌پذیری

طراحی بر اساس نیرو

خلاصه: در این پژوهش، یک سیستم ترکیبی شامل دیوار برشی گهواره‌ای و قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم برشی به‌عنوان یک گزینه نوین باربر جانبی پیشنهاد و بررسی شده است. هدف، ارزیابی نحوه توزیع نیروی طراحی بین دو سیستم و تعیین سهم هر یک از برش پایه کل در ساختمان‌های ۱۰ طبقه است. جهت مشخص شدن تأثیر پارامتر توزیع نیرو طراحی در مدل‌ها، چهار مدل با درصدهای مختلفی از توزیع نیرو بین دهانه‌های بابر جانبی سیستم مدلسازی شده است. همچنین جهت مشخص نمودن میزان حساسیت رفتار نمونه‌ها به میزان کابل مورد استفاده در مدل‌ها، چهار مدل با مساحت‌های متفاوت سطح مقطع کابل در عین ثابت ماندن سایر مشخصات مدل‌ها، مورد بررسی و با مدلی که قاب مهاربندی واگرا برای ۱۰۰٪ نیرو طراحی شده، مقایسه شده‌اند. روش طراحی برای سیستم پیشنهادی، روش نیرویی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد با افزایش سهم دیوار برشی گهواره‌ای (۱۰٪ تا ۴۰٪)، بازگشت‌پذیری سیستم بهبود یافته ولی استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش سطح مقطع کابل از ۳۰٪ به ۱۰۲۰٪ باعث افزایش سختی پس از تسلیم و ظرفیت نهایی شد، اما تأثیر قابل توجهی بر بازگشت‌پذیری یا مرکزگرایی نداشت. نوآوری این تحقیق، معرفی سیستمی ترکیبی با قابلیت همزمان اتلاف انرژی و برگشت‌پذیری لرزه‌ای است که می‌تواند به‌عنوان راهکاری کارآمد در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها مطرح شود.

۱- مقدمه

سیستم سازه‌ای ساختمان شده که این وضعیت تا زمانی که لنگر واژگونی از لنگر ناشی از بار ثقلی کمتر شود ادامه می‌یابد و جابجایی پسماند نیز در ساختمان نیز باقی می‌ماند. بنابراین محققین نیز برای جلوگیری این وضعیت در ساختمان، استفاده از ایده حرکت گهواره‌ای دیوار برشی دارای کابل‌های پیش تنیده را به‌عنوان روشی برای کاهش عملکرد غیرخطی محتمل در انواع سازه و برگشت‌پذیری آن، به عنوان یک روش بهینه مورد توجه قرار دادند [۴]. در کنار استفاده از روش گهواره‌ای، با توجه به اینکه خود سیستم‌های مهاربندهای همگرا و واگرا هر کدام به نوبه خود دارای مزایایی می‌باشند، استفاده از آن‌ها پیشنهاد می‌شود.

اولین تحقیقات در مورد قاب مهاربندی واگرا با تیر پیوند قائم (V-EBF) توسط سیکو و همکاران در سال ۱۹۸۸ صورت گرفت که در یک قاب دوطبقه یک دهانه از این سیستم استفاده کردند. منحنی‌های هیستریزس پایدار و مقارن حاصل از نتایج آزمایشگاهی آنها نشان دهنده قابلیت خوب این

با توجه به اینکه ساختمان‌های موجود در کشور بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ساختمان و به منظور تأمین سطح عملکرد ایمنی جانی^۱ تحت زلزله طرح ساخته می‌شوند، این ساختمان‌ها پس از زلزله طرح و حتی زلزله‌های با سطح پایین‌تر نیز معمولاً دچار خسارت و تخریب می‌شوند. لذا استفاده مجدد از این سازه‌ها با توجه به گستردگی خسارت و میزان هزینه ترمیم، عملاً کاری دشوار و مقرون به صرفه نیست. این موضوع سبب ظهور ایده‌های جدیدی توسط محققین به منظور هدایت خسارت به نقاط مشخصی از سازه شد تا بتوانند تنها با تعویض المان‌های آسیب‌دیده، با سرعت بیشتری از ساختمان‌ها بهره‌برداری نمایند [۱-۳]. از طرفی در ساختمان‌ها هنگامی که لنگر واژگونی ناشی از نیروهای جانبی زلزله از لنگر مقاوم ناشی از بارهای ثقلی بیشتر می‌شود، موجب وقوع حرکت گهواره‌ای در سازه و المان‌های باربر موجود در

1. Life Safety

2. Eccentrically Braced Frame with Vertical Link

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.gholami@yu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



سیستم در استهلاک انرژی می باشد [۵]. بعد از آن واکابایاشی با مقایسه رفتار V-EBF و سیستم مهاربندی شورن معکوس^۱ به صورت تئوری نشان داد که سیستم V-EBF دارای پایداری و رفتار مناسب تری است [۶]. بر اساس نتایج تحلیلی غیرخطی انجام شده توسط دوسیکا و همکاران که براساس دستورالعمل استانداردهای لرزه ای AISC صورت پذیرفت، مشخص شد که ظرفیت برشی نهایی با مقادیر آزمایشگاهی مطابقت خوبی داشته و جان آنها در برش جاری می شود [۷]. زهرانی و همکاران با بررسی آزمایشگاهی و تئوری پنج نمونه از قابهای V-EBF یک طبقه و یک دهانه دریافتند که منحنی های هیستریزس نمونه ها نشان دهنده عملکرد رضایت بخش این سیستم در جذب و استهلاک انرژی اعمال شده به سازه است و استفاده نکردن از سخت کننده تا پیش از کمانش جان تیرپیوند قائم تأثیری در رفتار نمونه ندارد ولی پس از آن به سرعت دچار افت مقاومت می شود. همچنین در تمامی نمونه ها ضریب رفتار بین ۷/۱۵ تا ۱۰/۶۵ به دست آمد که از مقدار ۷ که توسط آیین نامه طراحی لرزه ای ایران (استاندارد ۲۸۰۰) تعیین شده، بیشتر می باشد [۸، ۹]. خزائی و ناطقی الهی [۱۰] با ترکیب مهاربند همگرا با یک پانل فولادی برشی که در محل تقاطع مهاربندها به بررسی تئوری و آزمایشگاهی رفتار لرزه ای آن پرداختند. از مزایای مهم این سیستم، محدود شدن آسیب ها در میراگر به جای اعضاء اصلی و راحتی تعویض آن پس از زلزله می باشد. نکته اصلی در طراحی این سیستم این است که به خاطر اینکه پانل برشی بدون کمانش مهاربندها وارد ناحیه غیرخطی شود باید ظرفیت کمانش مهاربند سیستم بیشتر از ظرفیت پانل فولادی باشد. شایان فر و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۲ به مطالعه رفتار قاب های واگرا با لینک قائم با استفاده از روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مفاصل پلاستیک، جابه جایی درونی و چرخش پلاستیک تیرهای پیوند به طور یکنواختی در ارتفاع قاب توزیع می شوند. وتر و همکاران به مطالعه رفتار غیرخطی V-EBF پرداختند که نتایج همگرایی خوب از مدل تحلیلی ارائه شده با نتایج تجربی را نشان داد [۱]. لیان و مینگزو [۱۲] به مطالعه عملکرد لرزه ای V-EBF پرداختند. نتایج آنان نشان می دهد که نمونه ای یک دهانه و یک طبقه دارای سختی جانبی، شکل پذیری و قابلیت اتلاف انرژی قابل اطمینانی می باشد. یک بررسی تجربی قاب های مهاربندی واگرا مجهز به لینک قائم، نشان داد که استفاده از لینک های قائم ساخته شده از فولاد با نقطه تسلیم پایین، سبب می گردد تا لینک قائم قبل از شکست به حداکثر ظرفیت پیچشی خود برسد [۱۳، ۱۴].

1. Inverted Chevron-V braced frames

طی بررسی عملکرد لرزه ای قاب های بتن آرمه با حرکت گهواره ای کنترل شده به واسطه سیستم های برگشت پذیری فولادی، مشخص گردید که قاب های بتن مسلح گهواره ای نسبت به قاب معمولی اثرات زلزله بر روی سازه را با تضعیف سختی کلی، کاهش می دهد و به موجب آن، برش داخل طبقه به طرز قابل توجهی نیز کاهش می یابد. همچنین مشخص گردید که پاسخ هیستریزس نمونه ها پرچمی شکل شده و مرکزگرایی بطور عالی انجام شده است [۱۵-۱۷]. ماریوت و همکاران در سال ۲۰۰۷ امکان استفاده از سیستم گهواره ای و کابل های پیش تنیده را در جهت بهسازی لرزه ای سازه مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. همچنین آن ها در سال ۲۰۰۸ پس از انجام آزمایشاتی روی مدل مقیاس شده ای که مجهز به سیستم میراگرهای طرفین دیوار بود، کارایی و بهبود عملکرد لرزه ای سازه های موجود را نشان دادند [۴]. کیو و و همکاران در سال ۲۰۱۰ با انجام تحقیقات عددی به این نتیجه رسیدند که حداکثر جابه جایی در سازه های دارای دیوارهای گهواره ای، قابل کنترل بوده و سبب محدود شدن آسیب وارده بر سازه می شود. آن ها همچنین در سال ۲۰۱۲ کارایی این سیستم را در بهبود عملکرد یک ساختمان یازده طبقه با طبقه نرم به اثبات رساندند [۱۸]. لیو و همکاران در سال ۲۰۱۷ عملکرد لرزه ای قاب بتن آرمه با حرکت گهواره ای کنترل شده را مورد بررسی قرار دادند، تحقیقات آنان نشان داد که قاب بتن مسلح گهواره ای نسبت به قاب معمولی اثرات زلزله بر روی سازه را با تضعیف سختی کلی، کاهش می دهد. علاوه بر این، به موجب آن، برش داخل طبقه به طرز قابل توجهی نیز کاهش می یابد [۱۹]. خان محمدی و حیدری به بررسی بهبود رفتار لرزه ای ساختمان های دیوار برشی بتن مسلح با استفاده از سیستم های گهواره ای چندگانه در سال ۲۰۱۵ پرداختند. آن ها دریافتند که همه ساختمان های با ارتفاع مختلف و سیستم گهواره ای متفاوت در هر دو سطوح زلزله، مبنای طراحی حداکثر زلزله محتمل از دررفت های ماندگار ناچیزی برخوردار می باشند [۲۰]. امیردهنی و همکاران در سال ۲۰۱۶ رفتار لرزه ای قاب های مهاربندی فولادی با عملکرد گهواره ای مجهز به میراگرهای استهلاک انرژی را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها به این نتیجه رسیدند که با توجه به این که وقوع تغییر شکل های پلاستیک می تواند پایداری کلی سازه را به خطر بیندازد می توان با بکارگیری کابل های پس تنیده به عنوان کلیدی ترین عضو سازه ای در ایجاد قابلیت مرکزگرایی سیستم، میزان این تغییر شکل ها ماندگار را کاهش داد [۲۱].

محققان جهت استفاده از مزایای سیستم های استهلاک انرژی و سیستم های برگشت پذیری بطور همزمان در سازه ها، ترکیب هر دو سیستم را

پیشنهاد دادند. کلایتون و همکاران مطالعاتی را پیرامون سیستم دیوار برشی فولادی خود مرکز (SC-SPSW) ^۱ با هدف استفاده از مزایای قاب های فولادی پس تنیده خود محور و با استحکام و شکل پذیری دیوارهای برشی ورق فولادی بصورت عددی و آزمایشگاهی انجام دادند. شبیه سازی های عددی نشان داد که نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی مطابق خوبی دارد. علاوه بر این، نشان داد که سیستم آنان در عین استهلاک انرژی زیاد، برگشت پذیری مناسبی نیز دارد و عملکرد لرزه ای این سیستم جهت استفاده در سازه ها مناسب است [۲۲، ۲۳]. اولین آزمایشات میز لرزه ای بر روی سیستم لرزه ای SC-SPSW توسط دودن و همکاران در سال ۲۰۱۶ انجام شد. آنان دو قاب سه طبقه با اتصالات متفاوت را تحت رکوردهای زلزله قرار دادند و به نتیجه رسیدند که در هر دو قاب، برگشت پذیری قاب ها بطور مناسبی انجام می گیرد. همچنین پس از بارگذاری، نتایج نشان داد که خرابی ها به دیوار برشی فولادی محدود می گردد [۲۴]. کی و همکاران در سال ۲۰۲۱ نیز طی تحقیقی، قاب های بتنی خود مرکز مجهز به کابل های پس تنیده را بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می دهد که پیش تنیدگی اولیه رشته های کابل باعث بهبود عملکرد بتن برای ظرفیت های باربری می گردد و برای کاهش تغییر شکل های پسماند مفید واقع می گردد. همچنین دریافتند که افزایش عرض مقطع تیر در این سیستم، شکل پذیری را بهبود می بخشد [۲۵]. در سیستم قاب های واگرا با لینک قائم، هر چند محدودیت های معماری جهت ایجاد باز شو کمتر می شود و آسیب های ناشی از بارگذاری جانبی در لینک قائم متمرکز می شود؛ اما پس از بارگذاری جانبی، قاب واگرا دچار تغییر شکل پسماند قابل توجهی قرار می گیرد [۲۶]. در سیستم های قاب های خمشی پس تنیده برای تأمین امکان جابجایی کابل های پس تنیده، به اتصالات مفصلی با سوراخ لوبیایی نیاز است که تنها با یک پیچ مرکزی قابل اجرا هستند. این موضوع باعث بروز مشکلاتی از جمله تمرکز تنش در محل اتصال، کاهش ظرفیت باربری و محدودیت های جدی اجرایی، به ویژه در دهانه های باربر بزرگ و ساختمان های با اهمیت ویژه می شود. از این رو، دیوارهای گهواره ای گزینه مناسب تری برای تحقق سازه های مرکزگرا به شمار می آیند. از طرفی قابل توجه است که در سیستم قاب های واگرا با لینک قائم، هر چند محدودیت های معماری جهت ایجاد باز شو کمتر می شود و آسیب های ناشی از بارگذاری جانبی در لینک قائم متمرکز می شود؛ اما پس از بارگذاری جانبی، قاب مهاربندی واگرا دچار تغییر شکل پسماند قابل توجهی قرار می گیرد. بر این اساس، در این پژوهش برای

نخستین بار رفتار ترکیبی قاب مهاربندی واگرا و دیوار گهواره ای خودمركز تحت بارگذاری چرخه ای و شرایط مختلف توزیع برش پایه مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه، یک دهانه سیستم برگشت پذیر دیوار گهواره ای فولادی مجهز به کابل های پس تنیده، با استفاده از تیرهای رابط به دهانه قاب واگرا اضافه گردید تا در هنگام بارگذاری، دهانه مهاربندی واگرا مجهز به لینک قائم استهلاک انرژی قاب را انجام دهد و دیوار گهواره ای فولادی مجهز به کابل نیز سبب برگشت پذیری یا مرکزگرایی قاب گردد و در نهایت مزایا و معایب سیستم پیشنهادی مشخص گردد.

۲- معرفی مکانیزم رفتاری سیستم پیشنهادی

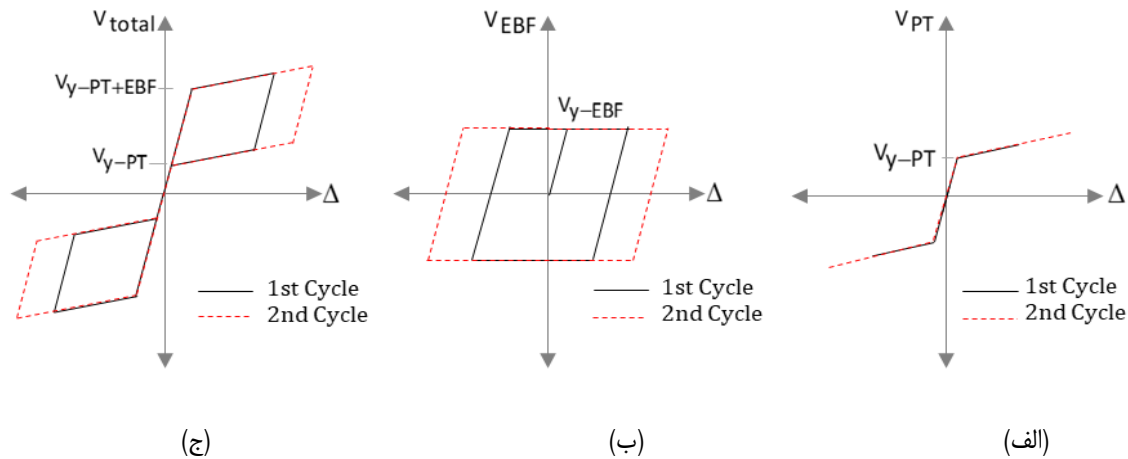
مکانیزم رفتاری سیستم پیشنهادی ^۲ (EBF-RCSW) به این صورت می باشد که استهلاک انرژی سیستم به واسطه قاب مهاربندی واگرا مجهز به لینک برشی قائم می باشد و ایجاد عملکرد برگشت پذیری سیستم به عهده دیوار برشی فولادی گهواره ای مجهز به کابل های پس تنیده است. در شکل (۱) رفتار نیرو-جابجایی سیستم پیشنهادی ترکیبی و هر یک از سیستم های قاب مهاربندی و دیوار برشی گهواره ای بصورت مجزا ارائه شده است، میزان برش پایه دیوار گهواره ای، میزان برش پایه قاب مهاربندی واگرا و برش پایه کل سیستم ترکیبی پیشنهادی EBF-RCSW می باشد. ضریب α نسبتی از سختی ثانویه به سختی اولیه می باشد همچنین ضریب β نشان دهنده میزان برگشت پذیری سیستم می باشد. ضرایب مذکور در روابط (۱) و (۲) ارائه شده اند. برای وضوح بیشتر اجزای سیستم پیشنهادی، در شکل (۲) شماتیک کلی سیستم شامل قاب مهاربندی واگرا، دیوار برشی گهواره ای، کابل های پس تنیده و لینک قائم نشان داده شده است.

$$\alpha = \frac{K_{\text{Secondary}}}{K_{\text{Initial}}} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{2V_d}{V_{py} + V_d} \quad (2)$$

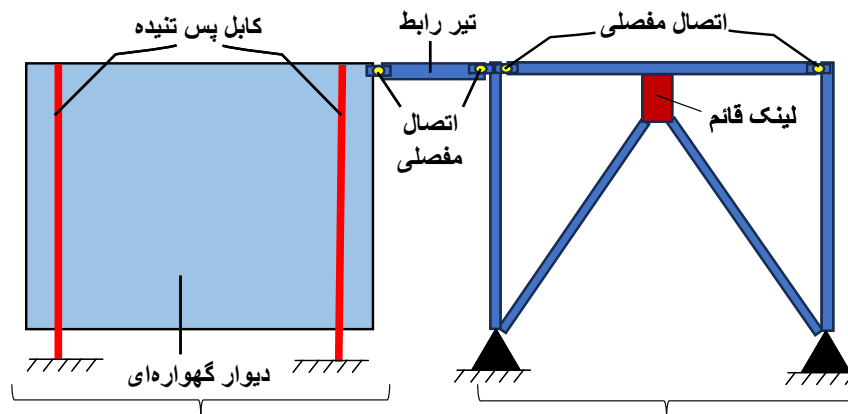
۳- اعتبار سنجی

در این تحقیق جهت اعتبارسنجی سیستم پیشنهادی، مدل آزمایشگاهی ارائه شده توسط قریشی و همکاران [۲۷] با استفاده از نرم افزار آباکوس مدل سازی گردید. سیستم مورد آزمایش آنان، یک سیستم دیوار برشی



شکل ۱. نمودار شماتیک نیرو-جابجایی: (الف) دیوار برشی گهواره‌ای مرکزگرا، (ب) قاب مهاربندی مجهز به لینک برشی قائم، و (ج) سیستم ترکیبی پیشنهادی EBF-RCS.

Fig. 1. Schematic force-displacement diagram. (a) Self-centering rocking shear wall, (b) Braced frame equipped with a vertical shear link, and (c) Proposed combined EBF-RCS system.



شکل ۱. دید شماتیک از سیستم پیشنهادی ترکیب قاب مهاربندی واگرا دارای لینک قائم + دیوار برشی گهواره‌ای مرکزگرا

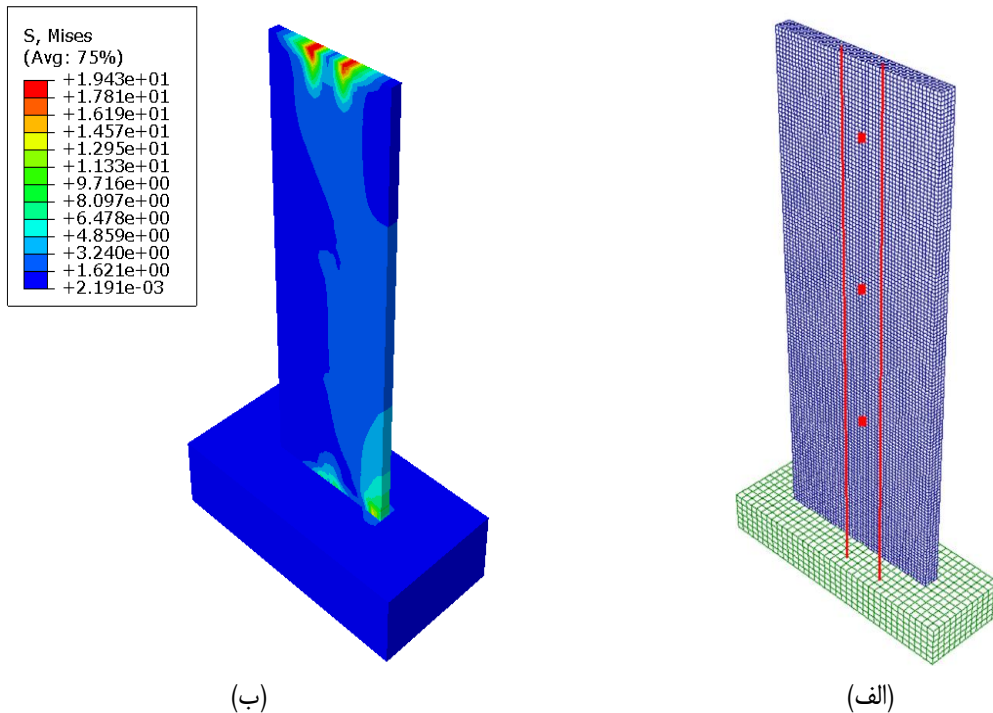
شکل ۱. دید شماتیک سیستم پیشنهادی ترکیب قاب مهاربندی واگرا و دیوار برشی گهواره‌ای مرکزگرا.

Fig. 1. Schematic view of the proposed system combining an eccentrically braced frame and a self-centering rocking shear wall.

کابل‌های پیش‌تنیده از المان Wire از نوع Truss دو گره‌ای سه بعدی (T3D2) دو بعدی استفاده شده است. حلگر مورد استفاده برای اعمال پیش تنیدگی به کابل‌ها و اعمال بار جانبی چرخه‌ای به مدل‌ها از نوع Dynamic Implicit و در دو گام (Step) که در گام اول اعمال حرارت و در گام دوم اعمال بارگذاری دینامیکی در نظر گرفته شده است. اعتبارسنجی مدل اجزای محدود با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود

گهواره‌ای متشکل از یک دیوار، دو کابل پس کشیده و همچنین یک میلگرد متصل کننده دیوار به فنداسیون مطابق شکل (۳-الف) می‌باشد که تحت یک رکورد زلزله با تحلیل تاریخچه زمانی قرار گرفته است.

برای مدل‌سازی نمونه اعتبار سنجی از المان‌های مختلفی استفاده شده است، به طوری که در مدل‌سازی دیوار برشی گهواره‌ای جهت ساخت صفحه فولادی صلب از المان Shell چهار گره‌ای (S4R) و جهت ساخت



شکل ۳. (الف) مدلسازی دیوار برشی گهواره‌ای و (ب) نحوه توزیع تنش در مدل اجزا محدودی دیوار برشی گهواره‌ای.

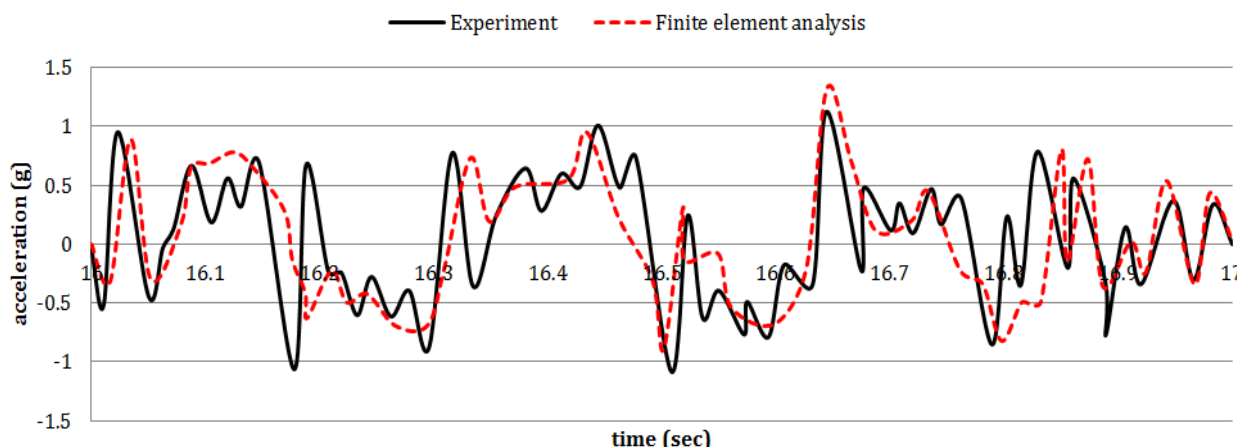
Fig. 3. (a) Modeling of the self-centering rocking shear wall, and (b) Stress distribution in the finite element model of the self-centering rocking shear wall.

می‌تواند ظرفیت مدلسازی صحیح این سیستم و سیستم‌های مشابه را داشته باشد. همچنین نتایج نشان داد که حداکثر خطای نسبی بین قلعه‌های پاسخ نمودار آزمایشگاهی و نمودار عددی کمتر از ۴٪ می‌باشد. این مقادیر بیانگر دقت بالای مدل عددی در بازتولید رفتار آزمایشگاهی می‌باشد.

در فرآیند استخراج داده‌های شتاب از مدل عددی، به‌منظور حذف نویزهای عددی و ارتقای دقت نتایج، از یک فیلتر پایین‌گذر Butterworth مرتبه چهارم استفاده شد. با توجه به آنکه دوره تناوب اصلی قاب ۱۰ طبقه مورد مطالعه حدود ۱/۰۸ ثانیه است (معادل فرکانس اصلی حدود ۰.۹ هرتز)، بازه فرکانسی مؤثر سیستم کمتر از ۲۰ هرتز در نظر گرفته شد. بر این اساس، مقدار فرکانس برش (cut-off frequency) برابر با ۲۰ هرتز انتخاب گردید تا مؤلفه‌های واقعی پاسخ در بازه فرکانسی سازه حفظ شده و اثر نویزهای عددی با فرکانس بالا حذف شود. اعمال این فیلتر موجب افزایش هم‌خوانی بین نتایج عددی و داده‌های آزمایشگاهی و بهبود کیفیت منحنی‌های شتاب به‌دست‌آمده گردید.

تحت بارگذاری دینامیکی تاریخچه زمانی انجام شد. گرچه تمرکز پژوهش حاضر بر بارگذاری چرخه‌ای است، باید توجه داشت که مکانیزم‌های اصلی خرابی در هر دو نوع بارگذاری مشابه هستند. همچنین یک تحلیل دینامیکی را می‌توان به‌صورت مجموعه‌ای از تحلیل‌های استاتیکی در گام‌های زمانی کوتاه در نظر گرفت؛ بنابراین انطباق مدل با نتایج دینامیکی، دقت آن در تحلیل‌های چرخه‌ای را نیز پشتیبانی می‌کند.

پس از مدلسازی و تحلیل مدل اجزا محدودی، مطابق شکل (۳-ب) مشخص گردید که بیشتر توزیع تنش در بالای دیوار برشی و درمحل مهار کابل‌ها به دیوار است. همچنین توزیع تنش‌ها نشان می‌دهد که در پایین دیوار، محل پنجه فشاری نیز تنش زیادی وجود دارد و پس از زلزله دو محل مذکور محتمل‌ترین قسمت‌ها جهت شکست می‌باشند. در شکل (۴)، منحنی شتاب-زمان حاصل از نرم افزار و آزمایش می‌باشد که نشان دهنده پوشش مناسب نمودار مدل آزمایشگاهی توسط نمودار مدل عددی در زمان‌های مختلف بارگذاری است. با توجه به شکل (۴)، مشخص است که تطابق خوبی بین نتایج آزمایش و تحلیل اجزاء محدود وجود دارد و نرم افزار آباکوس



شکل ۴. مقایسه شتاب حاصل از آزمایش و تحلیل اجزاء محدود [۲۷].

Fig. 4. Comparison of acceleration obtained from the experiment and finite element analysis [27].

C_i نیز ضریب توزیع نیروی جانبی طبقات و K ضریب اثر حرکت

شلاقی می باشد.

$$T = 1.4 \times 0.0488 \times H^{0.75} \quad (۶)$$

T زمان تناوب و H ارتفاع کل سازه می باشد.

برش پایه قاب‌های ۱۰ طبقه مورد بررسی در این پژوهش، مشخصات و میزان برش پایه کل برای آن‌ها در جدول (۱) محاسبه و بدست آمده است. میزان سهم برش پایه هر یک از قاب‌های سیستم پیشنهادی از برش پایه کل متناسب با سختی آن قاب بدست می‌آید و مطابق با رابطه (۵) که قبلاً ذکر شده است، توزیع نیروی بین طبقات هر یک از این قاب‌ها انجام می‌گردد. طراحی قاب مهاربندی واگرا مانند طراحی سازه‌های فولادی مرسوم از طراحی ظرفیتی و بر اساس ظرفیت نهایی لینک قائم (المان فیوز قاب مهاربندی واگرا) انجام شده ولی طراحی دیوار گهواره‌ای مرکزگرا مقداری پیچیده‌تر می باشد که در ادامه نحوه طراحی آن شرح داده شده است.

۴-۲- طراحی دیوار گهواره‌ای مرکزگرا و محاسبه مقدار نیروی پس‌تنیدگی لازم برای کابل (To) و مقدار دما (ΔT)

جهت ایجاد مکانیزم برگشت‌پذیری برای سیستم پیشنهادی، کابل‌ها باید پس‌تنیده شوند تا یک لنگر مقاوم در سیستم دیوار برشی ایجاد نمایند. پس برای بدست آوردن مقدار نیروی پیش‌تنیدگی مورد نیاز، مقادیر لنگر مقاوم و

۴- روش طراحی

۴-۱- بدست آوردن برش پایه به روش طراحی بر اساس نیرو برای مجموعه قاب پیشنهادی

روش طراحی در این پژوهش برای سیستم‌های مورد بررسی، روش طراحی نیرویی در نظر گرفته شده است که در این مورد، برش پایه، نیروی طراحی هر طبقه و ضریب توزیع نیروی برش پایه مطابق استاندارد زلزله ایران (استاندارد ۲۸۰۰) و مطابق زیر بدست می‌آید.

$$V_i = \frac{S_a}{RW_{Total}} \quad (۳)$$

که در این رابطه S_a شتاب طیفی می باشد که با استفاده از نمودار طیف شتاب استاندارد بعد از محاسبه زمان تناوب T به دست می‌آید، همچنین R ضریب رفتار و W_{Total} وزن کل سازه می باشد. برای توزیع برش پایه در طبقات از رابطه (۵) استفاده می‌شود.

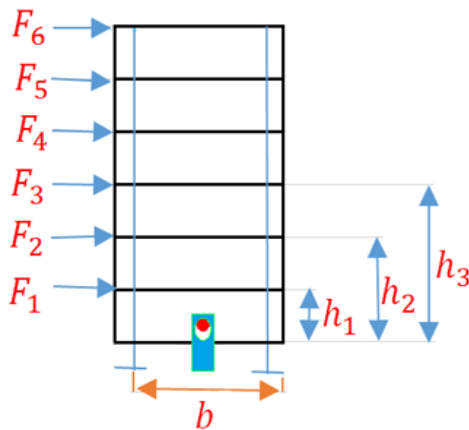
$$F_i = C_i V \quad (۴)$$

$$F_i = \frac{W_i h_i^K}{\sum_{j=1}^n w_j h_j^K} \quad (۵)$$

جدول ۱. مشخصات مدل ۱۰ طبقه جهت محاسبه برش پایه.

Table 1. Specifications of the 10-story model used for calculating the base shear.

پارامترها	واحد	مدل ۱۰ طبقه
وزن لرزه ای هر طبقه	Ton	۲۶۳
ارتفاع هر طبقه	m	۳/۹۶
زمن تناوب (T)	Sec	۱/۰۸
ضریب رفتار (R)	-	۷
سختی (K)	Ton/m	۱/۲۹
شتاب (S_a)	m/s ²	۰/۷۷۸
برش پایه (V)	Ton	۱۴۶/۱۱



شکل ۵. نحوه توزیع نیرو در هر طبقه متناسب با تراز ارتفاعی آن طبقه از سطح مبنا.

Fig. 5. Method of distributing the force on each story proportional to that story's elevation from the base level.

محرك را برابر هم قرار داده تا رابطه (۷) به دست آید و در نتیجه رابطه (۸) که همان مقدار نیروی پس تنیدگی (T_0) است حاصل شود.

$$F_h = T_0 b \quad (۷)$$

$$T_0 = \frac{F_h}{b} \quad (۸)$$

در این رابطه، b همان اندازه دهانه دیوار برشی گهواره‌ای منهای فاصله کابل پیش‌تنیده از هر دیوار از دو طرف می‌باشد. رابطه مقدار لنگر محرك ($M_{overturning}$) برابر مجموع حاصل ضرب نیروهای هر طبقه در ارتفاع آن طبقه از تراز پایه که بر اساس رابطه (۹) محاسبه می‌گردد و جزئیات آن مطابق شکل (۵) می‌باشد.

$$M_{overturning} = \sum_{i=1}^4 F_i \times h_i \quad (۹)$$

که در این رابطه F_i نیروی هر طبقه و h_i ارتفاع تراز پایه برای هر طبقه می‌باشد. منظور از نیروی هر طبقه در این بخش از طراحی، همان نیروی است که از سهم برش پایه مربوط به دهانه دیوار گواره‌ای مرکزگرا بین طبقات توزیع می‌شود و سهم دهانه دیوار برشی (سیستم برگشت‌پذیر) به

نسبت سختی آن دهانه بدست می‌آید که طراح سازه متناسب با برگشت‌پذیری مورد نیاز می‌تواند مقدار این سختی را با کاهش یا افزایش میزان نیروی پس‌تنیدگی اولیه تغییر دهد.

پس برای ایجاد حرکت گهواره‌ای دیوار برشی، باید لنگر محرك ($M_{overturning}$) از لنگر مقاوم ($M_R = T_0 * b$) بیشتر گردد تا بازشدگی بین تکیه گاه (فونداسیون) و دیوار ایجاد گردد و فشار بر روی پنجه فشاری ایجاد گردد.

از آنجایی که نیروی پس‌تنیدگی در نرم افزار بواسطه ایجاد حرارت در

جدول ۲. مشخصات مکانیکی المان‌های مورد استفاده در قاب‌ها و دیوارها

Table 2. Mechanical properties of the elements used in the frames and walls.

ویژگی‌های مکانیکی فولاد A416		ویژگی‌های مکانیکی فولاد A992	
چگالی ($\frac{N}{mm^3}$)	7.69×10^{-5}	چگالی ($\frac{N}{mm^3}$)	7.69×10^{-5}
مدول الاستیسیته	1.96×10^5	مدول الاستیسیته	1.99×10^5
ضریب پواسون	۰/۳۰	ضریب پواسون	۰/۳۰
تنش تسلیم (MPa)	۱۶۸۹/۹۰	تنش تسلیم (MPa)	۳۴۴/۷۳
تنش نهایی (MPa)	۱۸۶۱/۵۸	تنش نهایی (MPa)	۴۴۸/۱۵
ضریب انبساط حرارتی	1.17×10^{-5}		

نتایج این پژوهش به شرایط بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیکی محدود است و تعمیم آن‌ها به بارهای دینامیکی تصادفی یا سایر پیکربندی‌های هندسی نیازمند بررسی‌های تکمیلی خواهد بود.

در این مطالعه عملکرد دیوار برشی گهواره‌ای به همراه قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم هشت نمونه ۱۰ طبقه مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تسریع در نوشتار قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم با نام Brace x% و دیوار برشی گهواره‌ای با نام y% Rocking بیان شده و مقادیر x و y درصد نیروی اعمالی می‌باشند، همچنین درصد مساحت کابل (A_c) با z% Cable z% & Rocking x% نام گذاری شده‌اند که در آن Z درصد میزان افزایش کابل می‌باشد. در چهار نمونه اول آن کابل‌ها ثابت ولی نیروهای متفاوتی به سازه اعمال می‌گردد، نیروهای قاب مهاربندی واگرا (x% Brace) به ترتیب ۹۰، ۸۰، ۷۰ و ۶۰ درصد نیروی کل و متناظر با آن در دیوار برشی گهواره‌ای (y% Rocking) به ترتیب ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد نیروی کل جهت طراحی می‌باشند. در چهار نمونه دوم Brace z% Cable z% & Rocking m% n، مقدار نیرو ثابت (در قاب مهاربندی ۸۰ درصد نیروی کل و در دیوار برشی ۲۰ درصد نیروی کل) ولی با افزایش مساحت کابل به اندازه ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۴۰ و ۷۸۰ و ۱۰۲۰ درصد مساحت اولیه طراحی صورت گرفته است. در توزیع نیروی طراحی بین قاب مهاربندی واگرا و دیوار برشی گهواره‌ای، سهم کم‌تری برای دیوار برشی در نظر گرفته شده است. دلیل این امر آن است که وظیفه اصلی باربری جانبی و استهلاک انرژی بر عهده قاب مهاربندی واگرا می‌باشد. این قاب‌ها در فرآیند طراحی از سختی

کابل‌ها اعمال می‌شود، لازم است که رابطه بین دمای مورد نیاز و پس‌تنیدگی مورد نیاز را بدست آوریم. میزان تغییر دمای مورد نیاز جهت پس‌تنیده نمودن کابل‌ها در نرم افزار، طبق رابطه (۱۰) بدست می‌آید. که در این رابطه، E ضریب الاستیسیته کابل، A مساحت کابل و α ضریب انبساط حرارتی است.

$$\Delta T = \frac{T_0}{E A \alpha} \quad (10)$$

۵- مشخصات مدل‌های مورد مطالعه

در این تحقیق جهت مدل‌سازی کابل‌های پیش‌تنیده، از فولاد A416 Grade 270 استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی دیوار برشی گهواره‌ای فولادی و قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم که شامل تیرها، ستون‌ها، لینک‌های قائم و مهاربندها می‌باشد، از فولاد A992 استفاده شده است. مشخصات مکانیکی المان‌های مذکور جدول (۲) ارائه شده است.

در فرایند مدل‌سازی عددی، برای ساده‌سازی و تمرکز بر رفتار اصلی سیستم، چند فرض کلیدی در نظر گرفته شد؛ از جمله اینکه رفتار فولاد مصرفی بصورت دو خطی و با پلاستیک‌شدگی از نوع کینماتیک در نظر گرفته شده و اثر باوشینگر برای مشخصات مکانیکی المان‌ها نیز لحاظ شده است. اتصالات تیر و ستون به صورت مفصلی و ناحیه اتصال دیوار گهواره‌ای به فونداسیون به صورت تماس لغزشی و فشاری در نظر گرفته شد. همچنین اثرات سه‌بعدی ثانویه نظیر پیچش نادیده گرفته شد. لازم به ذکر است که

جدول ۳. تمامی مدل‌های مورد مطالعه.

Table 3. All models examined in the study.

شماره مدل	چهار مدل با مساحت سطح مقطع متغییر کابل	شماره مدل	چهار مدل با مساحت سطح مقطع یکسان کابل
۵	Brace 80% & Rocking 20% - Cable 3	۱	Brace 90% & Rocking 10%
۶	Brace 80% & Rocking 20% - Cable 5.4	۲	Brace 80% & Rocking 20%
۷	Brace 80% & Rocking 20% - Cable 7.8	۳	Brace 70% & Rocking 30%
۸	Brace 80% & Rocking 20% - Cable 10.2	۴	Brace 60% & Rocking 40%

(۱۰ سانتی‌متر) مش‌بندی شدند. دیوار فولادی صلب نیز به دلیل انتخاب رفتار Rigid برای آن، حساسیت کمی نسبت به مش داشته و برای آن مش درشت‌تر (۲۰ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد.

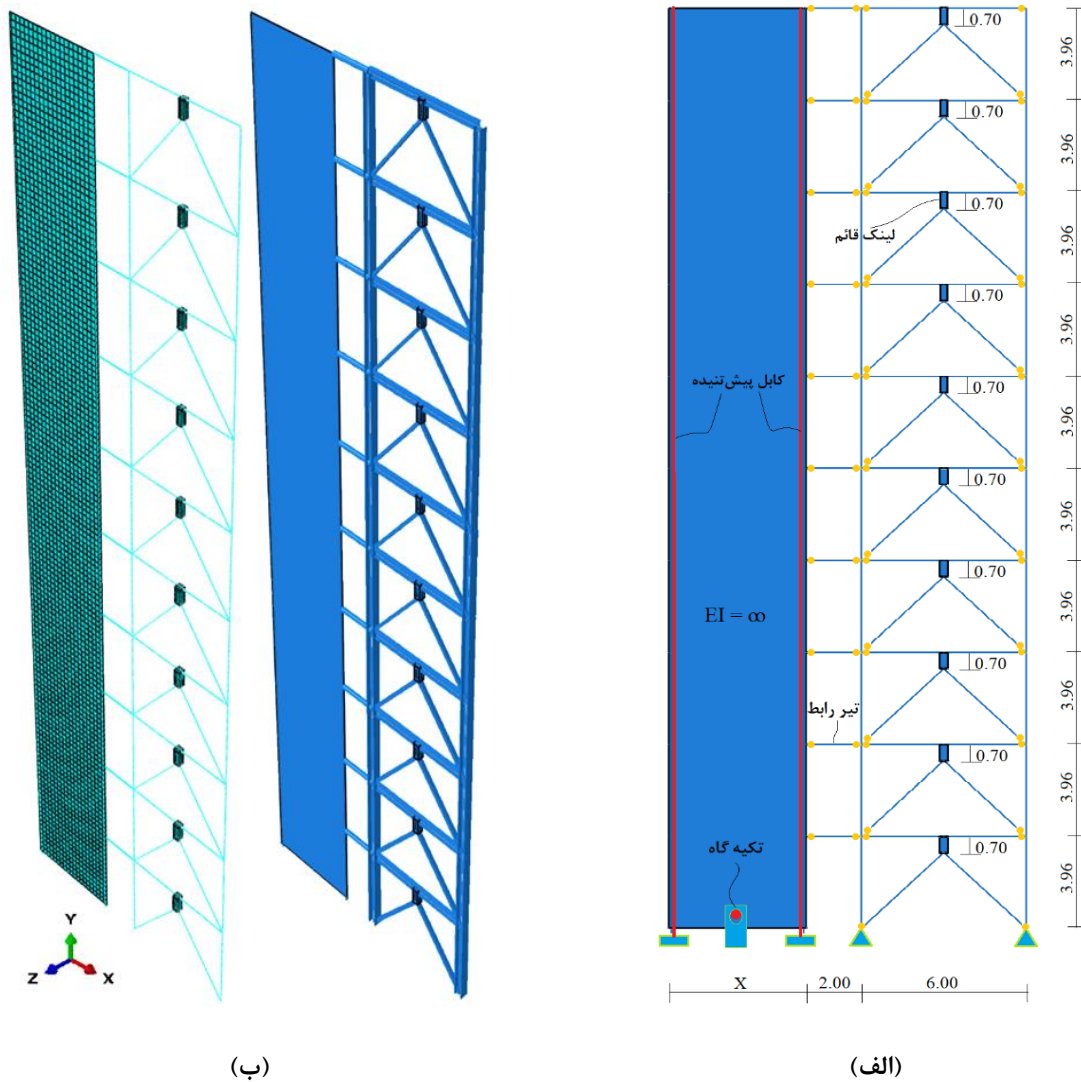
گفتنی است که در نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق، قاب‌ها دارای ۳ دهانه هستند که قاب سمت راست یک قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم که اتصالات لینک قائم به تیر و بادبند گیردار، اتصالات ستون‌ها به یکدیگر گیردار و سایر اتصالات مفصلی می‌باشند که عرض دهانه این قاب در کلیه نمونه‌ها ۶ متر می‌باشد. دهانه میانی نیز با تیرهایی که دو انتهای آن مفصلی می‌باشد دهانه‌های طرفین را به یکدیگر متصل می‌کند که طول دهانه آن ۲ متر است. همچنین دهانه سمت چپ نیز یک دیوار برشی گهواره‌ای می‌باشد که دارای یک تکیه‌گاه در مرکز پای دیوار (در جهت X مقید شده) و دو بالشتک در دو سوی دیوار می‌باشد که توسط دو کابل پیش‌تنیده مطابق شکل (۶) مهار شده است و طول دهانه آن برای چهار مدل 10% Rocking، 20% Rocking، 30% Rocking و 40% Rocking با مساحت کابل ثابت به ترتیب برابر ۴، ۵، ۶ و ۷ متر و برای چهار مدل با مساحت کابل متغیر و نیروی ثابت، برابر ۵ متر می‌باشد. ارتفاع تمام طبقات نیز ۴ متر می‌باشد. قابل ذکر است که دیوار برشی گهواره‌ای طوری طراحی شده که در برابر بارهای اعمالی در حالت الاستیک باقی بماند. وزن در تمام طبقات یکسان و برابر ۲۶۳۰ کیلو نیوتن است. همه مدل‌های این مطالعه مطابق جدول (۳) نام‌گذاری شدند.

روش طراحی ارائه شده در این بخش بنحوی تدوین شده است که تسلیم‌ها فقط در لینک قائم ایجاد شود و سایر اجزاء تا دریافت ۲ درصد الاستیک باقی بمانند. پس از طراحی، میزان برش پایه و سهم قاب واگرا و دیوار گهواره‌ای مطابق جدول (۴ و ۵) مشخص گردید.

بیشتری برخوردار هستند و به همین دلیل در تمامی مدل‌ها سهم بیشتری از برش پایه را متحمل می‌شوند. در مقابل، دیوار برشی گهواره‌ای عمدتاً برای بهبود خاصیت بازگشت‌پذیری و کاهش تغییر مکان‌های پسماند در سیستم در نظر گرفته شده است.

برای مدل‌سازی نمونه‌های مورد مطالعه از المان‌های مختلفی استفاده شده است، به طوری که در مدل‌سازی دیوار برشی گهواره‌ای جهت ساخت صفحه فولادی صلب از المان Shell چهار گره‌ای (S4R) و جهت ساخت کابل‌های پیش‌تنیده از المان Wire از نوع Truss دو گره‌ای سه بعدی (T3D2) دو بعدی استفاده شده است. همچنین در مدل‌سازی قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم برای اعضای تیر، ستون و مهاربند از المان Wire از نوع Beam دو گره‌ای (B31) و برای ساخت لینک قائم از المان Shell چهار گره‌ای (S4R) استفاده گردیده است. علاوه بر این، تیر رابط نیز از المان Wire از نوع Truss دو گره‌ای سه بعدی (T3D2) تعریف شده است. حلگر مورد استفاده برای اعمال پیش‌تنیدگی به کابل‌ها و اعمال بار جانبی چرخه‌ای به مدل‌ها از نوع Dynamic Implicit و با روند تحلیلی شبه استاتیکی (Quasi static) در نظر گرفته شده است.

برای انتخاب ابعاد المان‌ها، تحلیل حساسیت به مش انجام شد. نتایج حاصل از سه سطح مش (ریز، متوسط و درشت) نشان داد که اختلاف نتایج بین مش متوسط و ریز کمتر از ۵٪ است، در حالی که مش متوسط زمان محاسباتی کمتری نیاز دارد. بر این اساس، مش متوسط به عنوان گزینه نهایی انتخاب شد. با این حال، به دلیل تفاوت در نوع المان‌ها، مش‌بندی اجزا به صورت تفکیک شده انجام گرفت. لینک قائم که با المان Shell در نظر گرفته شد، به دلیل وقوع تسلیم در هنگام بارگذاری، نیازمند مش ریز (۱ سانتی‌متر) شد. سایر اعضا که با المان Beam مدل شدند، با مش متوسط



شکل ۶. (الف) دیوار برشی گهواره‌ای به همراه قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم، (ب) مدل سه بعدی و مش بندی دیوار برشی گهواره‌ای به همراه قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم.

Fig. 6. (a) Self-centering rocking shear wall along with an eccentrically braced frame with a vertical link, (b) Three-dimensional model and meshing of the self-centering rocking shear wall along with an eccentrically braced frame with a vertical link.

مقادیر حداکثر تجاوز نکرده باشد.

$$e \leq \frac{1.6M_P}{V_P} \quad (11)$$

$$V_P = 0.6F_y A_{IW} \quad (12)$$

قبل از طراحی و تعیین مشخصات پروفیل‌های قاب مهاربندی واگرا با پیوند قائم، طول پیوندها باید مورد بررسی قرار گیرند. به این صورت که کوچکترین و بزرگترین پروفیل W شکلی را که احتمال می‌دهیم در لینک‌های قائم مورد استفاده قرار گیرند را توسط رابطه (۱۱ تا ۱۳) کنترل می‌کنیم، که مقادیر مینیمم و ماکزیمم اندازه لینک مشخص شود. در نهایت پس از مدل‌سازی نیز یک کنترل نهایی انجام می‌شود که طول لینک از

جدول ۴. مقادیر نیروی برش پایه، سهم قاب و دیوار از برش پایه نظیر و سایر جزئیات چهار مدل با مساحت سطح مقطع یکسان کابل.

Table 4. Values of base shear, share of the frame and the wall in the base shear, and other details of four models with identical cable cross-sectional area.

مدل	Brace 90% & Rocking 10%	Brace 80% & Rocking 20%	Brace 70% & Rocking 30%	Brace 60% & Rocking 40%
طول دهانه دیوار برشی (m)	۴	۵	۶	۷
طول دهانه قاب مهاربندی واگرا (m)	۶	۶	۶	۶
طول تیر رابط (m)	۲	۲	۲	۲
طول لینک قائم (m)	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۷۰
سطح مقطع کابل (cm ²)	۸	۸	۸	۸
برش پایه (Ton)	۱۴۶/۱۱	۱۴۶/۱۱	۱۴۶/۱۱	۱۴۶/۱۱
سهم قاب مهاربندی واگرا از کل برش پایه (Ton)	۱۳۱/۵۰	۱۱۶/۹۰	۱۰۲/۳۰	۸۷/۷۰
سهم دیوار برشی مرکزگرا از کل برش پایه (Ton)	۱۴/۶۰	۲۹/۲۰	۴۳/۸۰	۵۸/۴۰
نیروی پس‌تنیدگی درون کابل (Ton)	۱۰۳/۸۰	۱۶۵/۳۰	۲۰۵/۹۰	۲۳۴/۸۰

جدول ۵. مقادیر نیروی برش پایه، سهم قاب و دیوار از برش پایه نظیر و سایر جزئیات چهار مدل با مساحت سطح مقطع متغییر. کابل.

Table 5. Values of base shear, share of the frame and the wall in the base shear, and other details of four models with variable cable cross-sectional area.

مدل	Brace 80% & Rocking 20% - Cable 3	Brace 80% & Rocking 20% - Cable 5.4	Brace 80% & Rocking 20% - Cable 7.8	Brace 80% & Rocking 20% - Cable 10.2
طول دهانه دیوار برشی (m)	۵	۵	۵	۵
طول دهانه قاب مهاربندی واگرا (m)	۶	۶	۶	۶
طول تیر رابط (m)	۲	۲	۲	۲
طول لینک قائم (m)	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۷۰
سطح مقطع کابل (cm ²)	۲۴	۴۳/۲۰	۶۲/۴۰	۸۱/۶۰
برش پایه (Ton)	۱۴۶/۱۱	۱۴۶/۱۱	۱۴۶/۱۱	۱۴۶/۱۱
سهم قاب مهاربندی واگرا از کل برش پایه (Ton)	۱۱۶/۹۰	۱۱۶/۹۰	۱۱۶/۹۰	۱۱۶/۹۰
سهم دیوار برشی مرکزگرا از کل برش پایه (Ton)	۲۹/۲۰	۲۹/۲۰	۲۹/۲۰	۲۹/۲۰
نیروی پس‌تنیدگی درون کابل (Ton)	۱۶۵/۳۰	۱۶۵/۳۰	۱۶۵/۳۰	۱۶۵/۳۰

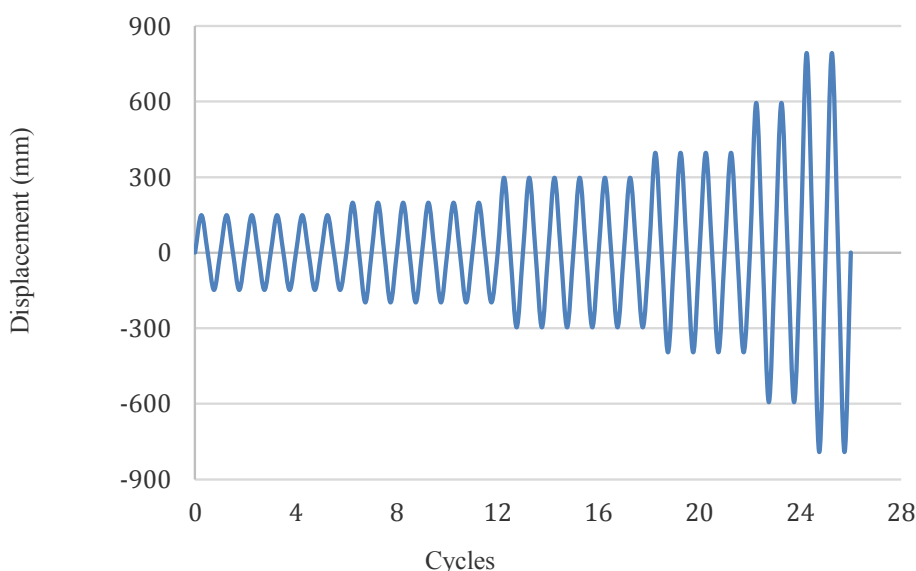
در شرایط مساحت کابل یکسان و همچنین تأثیر مساحت کابل بر رفتار سیستم با ثابت ماندن سایر مشخصات مدل‌های مورد نظر انجام گرفته است. از جمله دستورالعمل‌های بارگذاری چرخه‌ای می‌توان به دو دستورالعمل ATC-24 و SAC اشاره نمود. در ATC-24 از جابجایی تسلیم (Δ_y) به عنوان معیاری برای دامنه بارگذاری استفاده می‌شود. به دلیل ابهاماتی که در تعیین Δ_y وجود داشت در سال (۲۰۰۰) پروتکل SAC جایگزین ATC-24 در آئین نامه AISC-341 گردید [۱۷]. بنابراین در این بررسی از دستورالعمل SAC برای بارگذاری چرخه‌ای استفاده شد. در شکل (۷) چرخه‌ی بارگذاری نمونه‌ها نشان داده شده است که دامنه‌های جابجایی اعمالی به آن‌ها به ترتیب $0/375$ ، $0/5$ ، 1 ، $1/5$ و 2 درصد ارتفاع قاب در نظر گرفته شده است. بر اساس این پروتکل، دریافت جانبی سازه در بازه‌ی $0/375$ تا 2 درصد در چندین گام بارگذاری تکرار می‌شود. از آنجا که این مقادیر به صورت درصدی از دوران سازه تعریف می‌شوند، جابجایی مطلق از ضرب این درصد دوران‌ها در ارتفاع سازه بدست می‌آید. پس جابجایی مطلق متناظر در هر مدل بسته به ارتفاع کلی آن متفاوت خواهد بود. بدین ترتیب، با وجود تفاوت در جابجایی‌های واقعی به دست آمده برای مدل‌های مختلف، معیار درصدی دوران در تمامی سیستم‌ها یکسان در نظر گرفته شده است.

$$M_p = F_y Z \quad (13)$$

در روابط بالا، V_p و M_p به ترتیب برش پلاستیک و لنگر پلاستیک مقطع تیر پیوند می‌باشند. همچنین F_y تنش تسلیم فولاد تیر پیوند، Z اساس مقطع پلاستیک تیر پیوند، A_{TW} مساحت جان مقطع تیر پیوند می‌باشد.

۶- بارگذاری مدل‌های اجزا محدودی

بارگذاری نمونه‌ها در دو مرحله صورت می‌گیرد که در مرحله اول، کابل‌ها به روش اعمال حرارت پیش تنیده می‌شوند تا پس‌تنیدگی لازم را در قاب ایجاد کنند و در مرحله دوم، با اعمال بار پوش یا چرخه‌ای به صورت شبه استاتیکی به تراز بام قاب، تحت بارگذاری قرار می‌گیرد. جهت انجام بارگذاری پوش‌آور، بام قاب به عنوان نقطه‌ی اعمال بار، تحت جابجایی 2% ارتفاع قرار گرفته است. طراحی مورد انتظار در این پژوهش برای سیستم پیشنهادی بگونه‌ای است که در جابه‌جایی نسبی 2% تنها لینک‌های قائم باید تسلیم شوند و این در حالی است که نباید هیچ گونه تسلیمی در دیگر اعضا قاب مهاربندی یا دیوار برشی گهواره‌ای به وجود آید. هدف از بارگذاری و تحلیل چرخه‌ای، بررسی تأثیر پارامتر نیرو با بتاهای مختلف بر رفتار سیستم



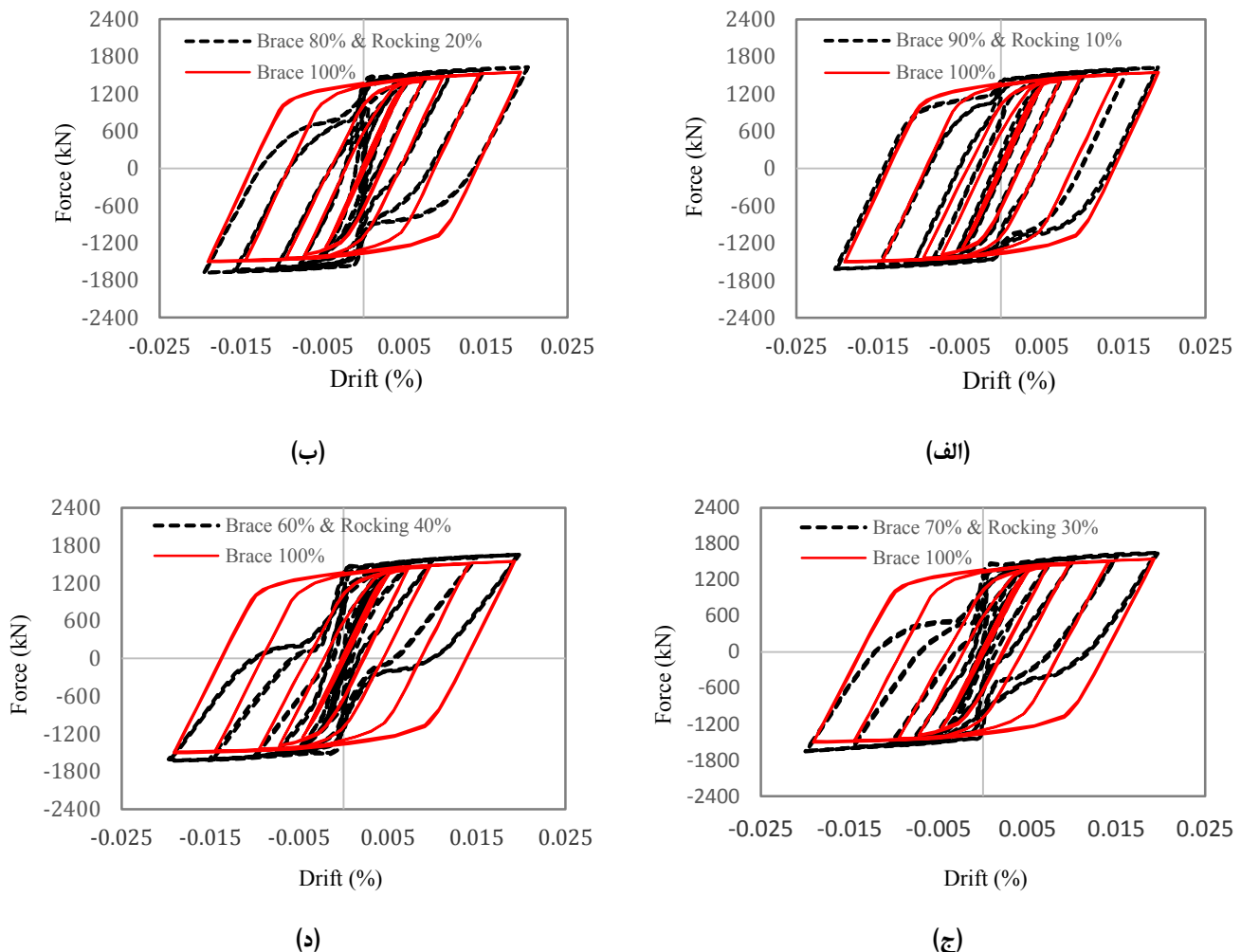
شکل ۷. چرخه‌ی بارگذاری مدل بر اساس پروتکل SAC.

Fig. 7. Loading cycle of the model based on the SAC protocol.

۷- مقایسه مدل‌های عددی

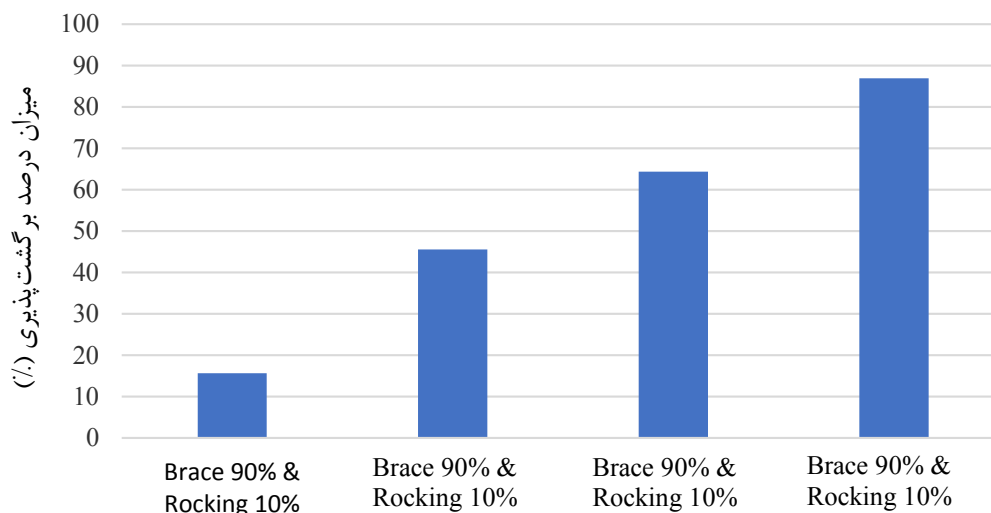
در این تحقیق رفتار چرخه‌ای (هیستریزیس) نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است تا رفتار و استهلاک انرژی قاب‌های پیشنهادی EBF-RCSW با پارامترهای متغیر $(y \text{ Rocking} \% \& x \% \text{ Brace})$ یا $(y \text{ Rocking} \% - \text{Cable } z)$ نسبت به یکدیگر و با قاب مهاربندی واگرای تنها با ۱۰٪ نیرو (Brace 100%) مشخص گردد. در شکل (۸) منحنی هیستریزیس نیرو-جابجایی چهار مدل از سیستم پیشنهادی EBF-RCSW با توزیع مختلف میزان درصد نیرو بین دهانه‌های قاب $(\text{Rock} \% \& x \% \text{ Brace})$ و $(y \text{ Rocking} \%)$ و با مساحت یکسان سطح مقطع کابل، نشان داده شده است.

انتخاب درصدهای مختلف توزیع نیروی طراحی بین قاب مهاربندی واگرا و دیوار برشی گهواره‌ای (از ۱۰٪ تا ۴۰٪ برای دیوار) با هدف بررسی نقش تعادلی بین ظرفیت اتلاف انرژی و میزان برگشت‌پذیری صورت گرفت. همچنین تغییر سطح مقطع کابل در بازه مشخص، برای ارزیابی اثر آن بر سختی ثانویه و ظرفیت نهایی انتخاب شد. از شکل (۸) مشاهده می‌گردد که قاب‌های پیشنهادی که در آن‌ها دهانه برگشت‌پذیر برای نیروی بیشتری $(y \text{ Rocking} \%)$ طراحی شده‌اند، حلقه‌هایی لاغرتر و پرچمی شکل دارند و میزان برگشت‌پذیری نیز بطور قابل توجهی در آن‌ها افزایش یافته است. ولی استهلاک انرژی با کاهش نیروی



شکل ۸. منحنی چرخه‌ای دیوار برشی گهواره‌ای به همراه قاب مهاربندی واگرا مجهز به لینک قائم با نیروی متفاوت و مساحت کابل ثابت: (الف) Brace 90% & Rocking 10%، (ب) Brace 80% & Rocking 20%، (ج) Brace 70% & Rocking 30% و (د) Brace 60% & Rocking 40%.

Fig. 8. Cyclic curve of the self-centering rocking shear wall along with an eccentrically braced frame equipped with a vertical link under different force distributions and constant cable area. (a) Brace 90% & Rocking 10%, (b) Brace 80% & Rocking 20%, (c) Brace 70% & Rocking 30%, and (d) Brace 60% & Rocking 40%.



شکل ۹. برگشت پذیری برای هر چهار نمونه با نیروی متفاوت و مساحت کابل ثابت.

Fig. 9. Recoverability for all four specimens with different forces and constant cable area.

فولادی مرکزگرا) نسبت به منحنی‌های سیستم پیشنهاد شده در این مقاله، سختی ثانویه (سختی پس از جابجایی مربوط به تسلیم) بیشتری داشته‌اند. اما سطح داخل حلقه‌های هیستریزس سیستم پیشنهادی آنان، بسیار کمتر از مدل‌های پیشنهادی در این مطالعه می‌باشد [۲۴ و ۲۵] و منحنی‌های سیستم پیشنهادی ارائه شده در این تحقیق نسبت به مطالعات مشابه، به منحنی ایده‌آل پرچمی شکل نزدیک‌تر است. بنابراین، نقاط قوت اصلی سیستم پیشنهادی را می‌توان در برگشت‌پذیری لرزه‌ای قابل توجه، شکل هیستریزس پرچمی و محدودسازی ناحیه پلاستیک به لینک قائم دانست که آن را نسبت به سیستم‌های قبلی متمایز می‌سازد.

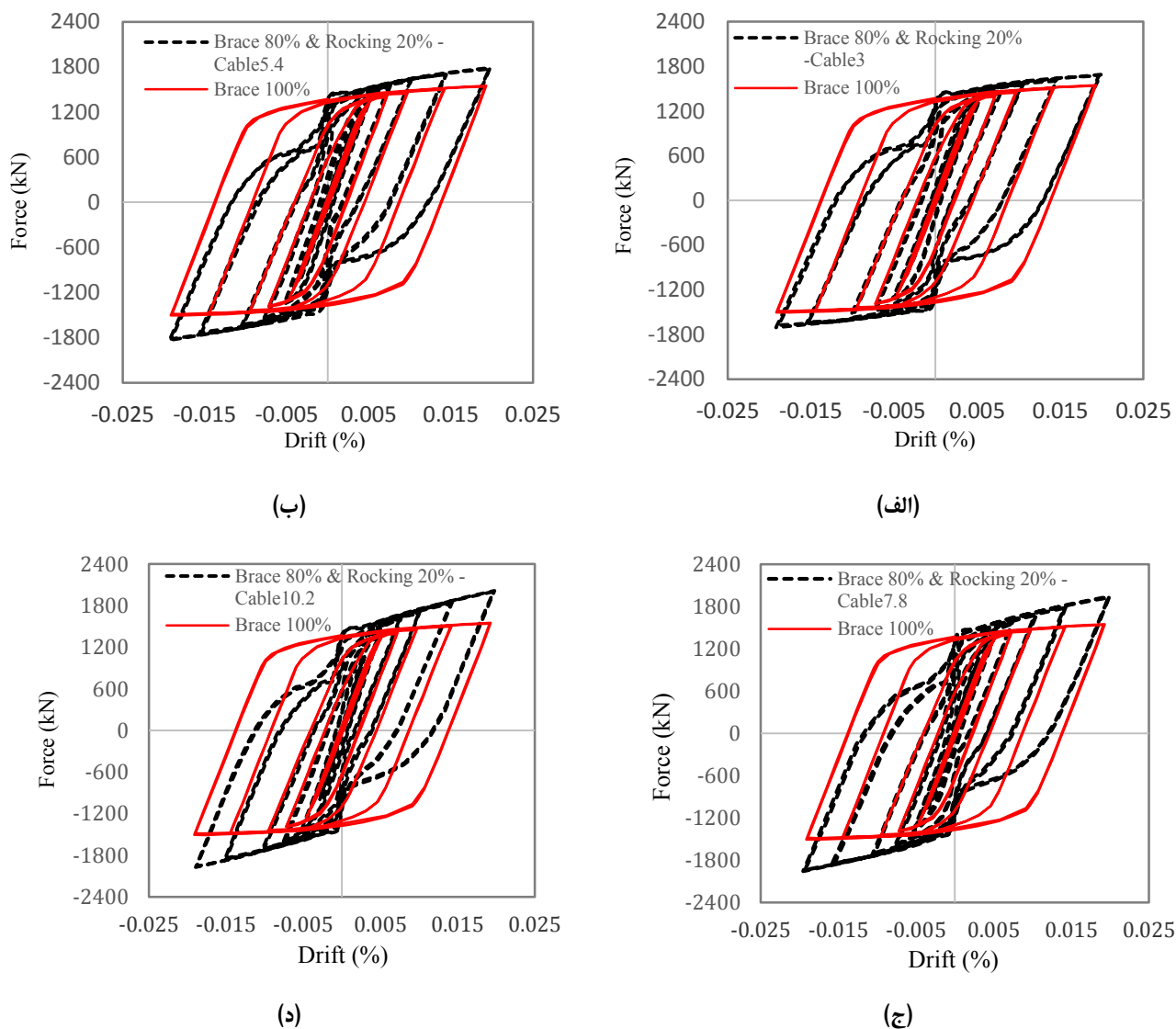
همانطور که مطابق طراحی انتظار داشتیم در قاب مهاربندی واگرا فقط لینک قائم تسلیم شود و سایر اجزای قاب متناسب با ظرفیت این المان تسلیم شده طراحی شوند و دچار تسلیم نگردند؛ شکل (۱۰) نشان می‌دهد که این عملکرد به درستی انجام شده است و فقط لینک قائم دچار تسلیم و پلاستیک‌شدگی شده است و از طرفی از نمودارهای هیستریزس شکل (۱۰) و توزیع تنش شکل (۱۱) نیز این موضوع قابل استنباط می‌باشد.

در شکل (۱۲) مقایسه‌ی ضریب اتلاف انرژی (E_p) و اتلاف انرژی (E_D) مدل‌ها در دررفت‌های مختلف و همچنین میزان اتلاف انرژی تجمعی آن‌ها نشان داده شده است. از این منحنی‌ها مشاهده می‌شود که افزایش نیرو طراحی قاب مهاربندی واگرا ($\text{Bracing } x\%$) و کاهش نیرو طراحی

طراحی دهانه مهاربندی واگرا و افزایش نیروی طراحی دهانه دیوار برشی گهواره‌ای مرکزگرا با کاهش مواجه بوده است؛ بطوری که استهلاک انرژی قاب EBF-RCSW با نیروهای طراحی Brace 70% & Rocking 30%، Brace 80% & Rocking 20% و Brace 90% & Rocking 10% به ترتیب ۱۲٪، ۲۸٪ و ۴۴٪ بیشتر از قاب با نیروی طراحی Brace 60% & Rocking 40% شده است. مقدار برگشت‌پذیری برای هر چهار نمونه با توزیع مختلف نیروی برشی و سطح مقطع یکسان کابل، مطابق نمودار شکل (۹) می‌باشد.

همچنین منحنی هیستریزس چهار مدل از سیستم پیشنهادی EBF-RCSW با میزان متفاوت مساحت سطح مقطع کابل و ثابت ماندن سایر پارامترها ($\text{Brace } \% \text{ \& Rocking } \% - \text{Cable } z$)، نیز مطابق شکل (۱۰) می‌باشد. با افزایش میزان مساحت سطح مقطع کابل، میزان سختی ثانویه و سطح مقاومت نهایی مطابق شکل (۱۰) بطور چشمگیری افزایش یافته است؛ ولی این افزایش مساحت سطح مقطع کابل، تاثیر چندانی بر میزان برگشت‌پذیری یا مرکزگرایی مدل‌ها نداشته است. همه نمونه‌ها حلقه‌های هیستریک پایدار و چاقی را تحت بارگذاری از خود نشان داده‌اند و مانند سایر سیستم‌های مشابه انجام شده توسط سایر محققین، رفتار مطلوبی دارند.

منحنی‌های هیستریزس سیستم کلايتون و همکاران (دیوار برشی

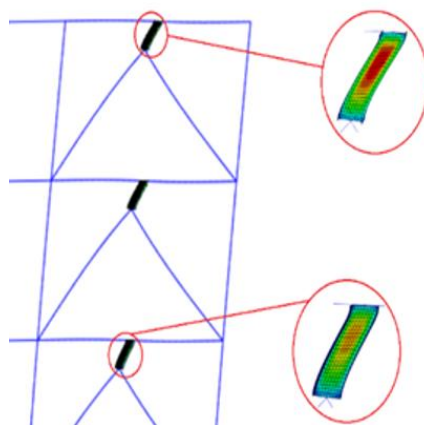


شکل ۱۰. منحنی‌های چرخه‌ای دیوار برشی گهواره‌ای به همراه قاب مهاربندی واگرا مجهز به لینک قائم با نیروی ثابت و مساحت کابل متغیر: (الف) Brace 80% & Rocking 20% - Cable 3، (ب) Brace 80% & Rocking 20% - Cable 5.4، (ج) Brace 80% & Rocking 20% - Cable 7.8، (د) Brace 80% & Rocking 20% - Cable 10.2.

Fig. 10. Cyclic curves of the self-centering rocking shear wall along with an eccentrically braced frame equipped with a vertical link under constant force and variable cable area. (a) Brace 80% & Rocking 20% - Cable 3, (b) Brace 80% & Rocking 20% - Cable 5.4, (c) Brace 80% & Rocking 20% - Cable 7.8, and (d) Brace 80% & Rocking 20% - Cable 10.2.

برای مدل‌های با میزان مساحت مختلف کابل، یکسان می‌باشد. میزان برش طراحی، مقاومت نهایی، ضریب سختی ثانویه برای هر مدل از قاب پیشنهادی نیز مطابق جدول (۶) از نمودارها استخراج گردید و مشخص شد که با افزایش میزان مساحت کابل سیستم برگشت‌پذیر، ضریب سختی ثانویه بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

در دیوار برشی گهواره‌ای (y% Rocking)، تاثیر قابل توجهی در میزان افزایش اتلاف انرژی مدل‌ها دارد. مطابق نمودارهای هیستریزس کاملاً واضح است که پارامتر مساحت سطح مقطع کابل بر میزان اتلاف انرژی مدل‌ها تاثیر قابل توجهی ندارد. زیرا، در سیستم مورد نظر، اتلاف انرژی توسط قاب مهاربندی واگرا (EBF) انجام می‌شود و نیروی طراحی آن (Brace)



شکل ۱۱. توزیع تنش پلاستیک معادل در بخش قاب مهاربندی واگرا و تمرکز پلاستیک‌شدگی در لین قائم.

Fig. 11. Distribution of equivalent plastic strain in the eccentrically braced frame and concentration of plasticity in the vertical link.

جدول ۶. نتایج حاصل از تحلیل‌های چرخه‌ای.

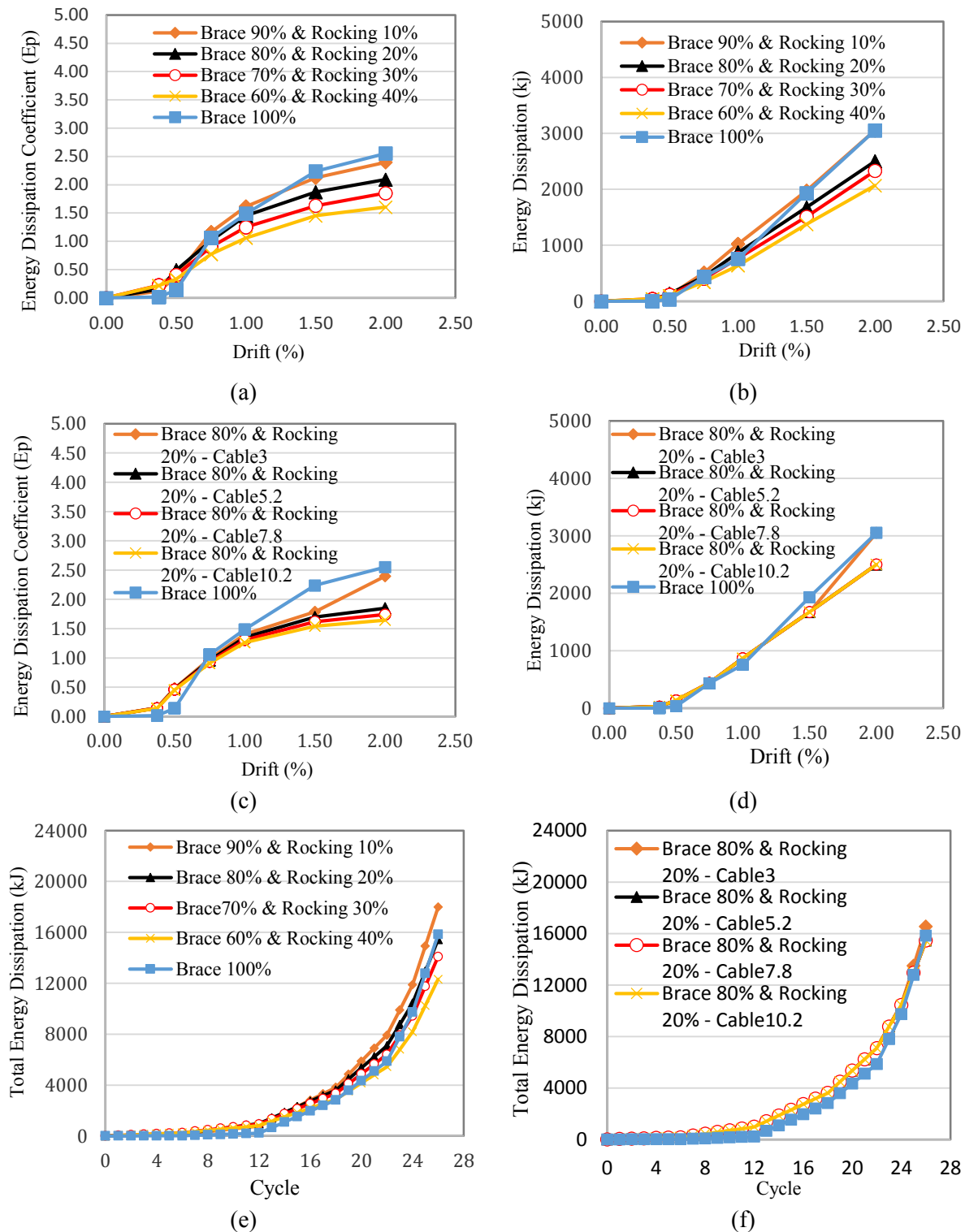
Table 6. Results obtained from the cyclic analyses.

مدل	برش طراحی (ton)	مقاومت نهایی (ton)	ضریب سختی ثانویه (α)
Brace 90% & Rocking 10%	۱۴۶/۱۱	۱۶۰	۰/۰۵۳۰
Brace 80% & Rocking 20%	۱۴۶/۱۱	۱۶۰	۰/۰۶۳۵
Brace 70% & Rocking 30%	۱۴۶/۱۱	۱۶۱	۰/۰۷۴۱
Brace 60% & Rocking 40%	۱۴۶/۱۱	۱۶۲	۰/۰۸۴۵
Brace 80% & Rocking 20% - Cable 3	۱۴۶/۱۱	۱۶۸	۰/۰۹۱۸
Brace 80% & Rocking 20% - Cable 5.4	۱۴۶/۱۱	۱۸۰	۰/۱۲۳۶
Brace 80% & Rocking 20% - Cable 7.8	۱۴۶/۱۱	۱۹۱	۰/۱۵۳۲
Brace 80% & Rocking 20% - Cable 10.2	۱۴۶/۱۱	۲۰۳	۰/۱۸۰۸

۸- نتیجه‌گیری

بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل‌های عددی نشان دادند که افزایش سهم دیوار برشی گهواره‌ای موجب بهبود قابل توجه بازگشت‌پذیری و شکل پرچمی هیستریزیس شده، در حالی که افزایش سطح مقطع کابل نقش مؤثری در ارتقای سختی ثانویه و ظرفیت نهایی سیستم دارد. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که رفتار مشاهده‌شده قابل تفسیر بر اساس مکانیزم‌های سیستم‌های سازه‌ای است. کاهش دررفت پسماند ناشی از نقش دیوار گهواره‌ای در ایجاد برگشت‌پذیری بوده که با کاهش سختی در چرخه‌های بارگذاری در هنگام

هدف این مطالعه، بررسی و معرفی یک سیستم ترکیبی نوین شامل قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم برشی و دیوار برشی گهواره‌ای بتنی بود که بتواند همزمان بازگشت‌پذیری لرزه‌ای و ظرفیت اتلاف انرژی را فراهم نماید. در این مطالعه، عملکرد سیستم ترکیبی دیوار برشی گهواره‌ای با قاب مهاربندی واگرا مجهز به لینک قائم برشی با بررسی چهار مدل ۱۰ طبقه از نظر تأثیر نیروی طراحی و مساحت کابل بر رفتار چرخه‌ای سیستم مورد



شکل ۱۲. (الف) ضریب اتلاف انرژی (EP) مدل‌ها با نیروی مختلف و کابل ثابت، (ب) اتلاف انرژی (ED) مدل‌ها با نیروی مختلف و کابل ثابت، (ج) ضریب اتلاف انرژی (EP) مدل‌ها با نیروی ثابت و کابل ثابت، (د) اتلاف انرژی (ED) مدل‌ها با نیروی ثابت و کابل متغیر، (ه) اتلاف انرژی تجمعی مدل‌ها با نیروی مختلف و کابل ثابت، و (و) اتلاف انرژی تجمعی مدل‌ها با نیروی ثابت و کابل متغیر.

Fig. 12. (a) Energy dissipation coefficient (EP) of the models with different forces and constant cable area, (b) Energy dissipation (ED) of the models with different forces and constant cable area, (c) Energy dissipation coefficient (EP) of the models with constant force and constant cable area, (d) Energy dissipation (ED) of the models with constant force and variable cable area, (e) Cumulative energy.

link in eccentrically braced frames, *Steel & Composite Structures*, 12(1) (2012) 13–29.

- [7] P. Dusicka, A.M. Itani, I.G. Buckle, Evaluation of conventional and specialty steels in shear link hysteretic energy dissipators, in: *Proc., 13th World Conf. on Earthquake Engineering*, 2004.
- [8] S.M. Zahrai, A. Moslehitabar, Cyclic behaviour of steel braced frames having shear panel system, (2006).
- [9] S.M. Zahrai, Y. Laboratory investigation of the application of vertical beam in improving the seismic performance of steel buildings, *Journal of Civil Engineering and Surveying*, Faculty of Engineering, Volume 44, Number 3, Pages 379-393 (In Persian) (2009).
- [10] M. Khazaei-Poul, F. Nateghi-Alahi, E. Alavi, Seismic behaviour of concentrically braced frame system combined with steel shear panel, in: *Proceedings of the 9th International Congress on Civil Engineering*, Isfahan University of Technology Isfahan, 2012.
- [11] M. Shayanfar, A. Rezaeian, A. Zanganeh, Seismic performance of eccentrically braced frame with vertical link using PBPD method, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(1) (2014) 1–21.
- [12] M. Lian, M. Su, Seismic performance of high-strength steel fabricated eccentrically braced frame with vertical shear link, *Journal of Constructional Steel Research*, 137 (2017) 262–285.
- [13] K. Park, B. Price, C. Jiansinlapadamrong, S.-H. Chao, Seismic behavior of double-HSS links for eccentrically braced frames, *Engineering Structures*, 239 (2021) 112297.
- [14] L. Zhuang, J. Wang, X. Nie, Z. Wu, Experimental study on seismic behaviour of eccentrically braced composite frame with vertical LYP steel shear link, *Engineering structures*, 255 (2022) 113957.
- [15] M. Katrangi, M. Khanmohammadi, Experimental study of seismic performance of an innovative low-damage self-centering composite steel plate shear wall, *Journal of Structural Engineering*, 150(1) (2024) 04023212.
- [16] G. Xiao, H. Wang, P. Pan, Seismic performance of

بار برداری منجر می‌شود. همچنین بررسی شرایط مختلف توزیع برش پایه نشان داده که با افزایش سهم دیوار در تحمل برش، رفتار سیستم پایدارتر و برگشت‌پذیرتر می‌گردد. بنابراین، سیستم ترکیبی دیوار برشی گهواره‌ای با قاب مهاربندی واگرا می‌تواند به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر زلزله با قابلیت اتلاف انرژی بالا و بازگشت‌پذیری مطلوب مورد استفاده قرار گیرد. سیستم پیشنهادی توانسته است نقاط ضعف سیستم‌های مشابه در تحقیقات پیشین را برطرف کرده و رفتاری نزدیک به مدل ایده‌آل پرچمی ارائه دهد. نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه یک سامانه ترکیبی است که ضمن تمرکز تغییرشکل پلاستیک در لینک قائم و تضمین عملکرد قابل کنترل آن، توانایی دستیابی به پایداری چرخه‌ای، برگشت‌پذیری لرزه‌ای و ظرفیت مطلوب اتلاف انرژی را دارا می‌باشد. بنابراین، این سیستم می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد برای طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها در مناطق زلزله‌خیز مطرح گردد.

منابع

- [1] M.G. Vetr, A. Ghamari, J. Bouwkamp, Investigating the nonlinear behavior of Eccentrically Braced Frame with vertical shear links (V-EBF), *Journal of Building Engineering*, 10 (2017) 47–59.
- [2] A. Lettieri, A. de la Peña, F. Freddi, M. Latour, Damage-free self-centring links for eccentrically braced frames: development and numerical study, *Journal of Constructional Steel Research*, 201 (2023) 107727.
- [3] F.R. Rofooei, M. Soleimani, Assessment of the seismic behavior of self-centering eccentrically braced frames with vertical link-beam, in: *Structures*, Elsevier, 2023, pp. 1285–1305.
- [4] M. Midorikawa, T. Azuhata, T. Ishihara, A. Wada, Shaking table tests on seismic response of steel braced frames with column uplift, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35(14) (2006) 1767–1785.
- [5] M. Seki, H. Katsumata, H. Uchida, T. Takeda, Study on earthquake response of two-storied steel frame with Y-shaped braces, in: *Proceedings 9th world conference on earthquake engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, 1988.
- [6] M. Shayanfar, M. Barkhordari, A. Rezaeian, Experimental study of cyclic behavior of composite vertical shear

- Construction scientific-research journal., (2015).
- [23] P. Clayton, D. Dowden, C. Li, J. Berman, M. Bruneau, K. Tsai, L. Lowes, Advances in self-centering steel plate shear wall testing and design, in: 10th US National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering, 2014.
- [24] P.M. Clayton, D.M. Dowden, C.-H. Li, J.W. Berman, M. Bruneau, L.N. Lowes, K.-C. Tsai, Self-centering steel plate shear walls for improving seismic resilience, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 10(3) (2016) 283–290.
- [25] D.M. Dowden, M. Bruneau, Dynamic shake-table testing and analytical investigation of self-centering steel plate shear walls, *Journal of Structural Engineering*, 142(10) (2016) 04016082.
- [26] X. Cai, Z. Pan, Y. Zhu, N. Gong, Y. Wang, Experimental and numerical investigations of self-centering post-tensioned precast beam-to-column connections with steel top and seat angles, *Engineering Structures*, 226 (2021) 111397.
- [27] I.M. Qureshi, P. Warnitchai, Computer modeling of dynamic behavior of rocking wall structures including the impact-related effects, *Advances in Structural Engineering*, 19(8) (2016) 1245–1261.
- damaged frame retrofitted with self-centering and energy-dissipating rocking wall, *Resilient Cities and Structures*, 2(1) (2023) 143–151.
- [17] L.-H. Xu, Y. Zhang, Hysteresis behavior of bottom-story self-centering shear wall with steel brace-assembled bottom, *Journal of Constructional Steel Research*, 186 (2021) 106893.
- [18] D. Marriott, S. Pampanin, D. Bull, A. Palermo, Improving the seismic performance of existing reinforced concrete buildings using advanced rocking wall solutions, (2007).
- [19] A. Wada, Z. Qu, H. Ito, S. Motoyui, H. Sakata, K. Kasai, Seismic retrofit using rocking walls and steel dampers, in: *Improving the seismic performance of existing buildings and other structures*, 2010, pp. 1010–1021.
- [20] L. Lu, X. Liu, J. Chen, X. Lu, Seismic performance of a controlled rocking reinforced concrete frame, *Advances in Structural Engineering*, 20(1) (2017) 4–17.
- [21] M. Khanmohammadi, S. Heydari, Seismic behavior improvement of reinforced concrete shear wall buildings using multiple rocking systems, *Engineering Structures*, 100 (2015) 577–589.
- [22] A.A. Amir Zehni H., Shafie I., , study of the seismic behavior of steel bracing frames with rocking behavior equipped with energy dissipation fuses, *Iranian Structural Engineering Association Structural Engineering and*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Dorj, M. Gholami, A. H. Parvizi, *Evaluation of the Performance of Rocking Wall with Eccentrically Braced Frame with Vertical Link Based on the Force Design Method*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(8) (2025) 1431-1454.

DOI: [10.22060/ceej.2025.24380.8311](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.24380.8311)



جدول مشخصات قاب‌های مهاربندی واگرا									
		قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم مدل طراحی شده با ۱۰۰ درصد نیرو (Brace 100%)				قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم مدل طراحی شده با ۹۰ درصد نیرو (Brace 90%)			
طبقات	ارتفاع طبقات (m)	مقطع تیر	مقطع ستون	مقطع بادبند	مقطع لینک قائم	مقطع تیر	مقطع ستون	مقطع بادبند	مقطع لینک قائم
10	3.96	W14×68	W14×145	HSS7×7×5/8	W12×136	W14×61	W14×120	HSS7×7×5/8	W12×120
9	3.96	W14×68	W14×176	HSS7×7×5/8	W12×136	W14×61	W14×145	HSS7×7×5/8	W12×120
8	3.96	W14×68	W14×233	HSS8×8×1/2	W12×136	W14×61	W14×193	HSS8×8×1/2	W12×120
7	3.96	W14×68	W14×370	HSS8×8×1/2	W12×136	W14×61	W14×311	HSS8×8×1/2	W12×136
6	3.96	W14×68	W14×398	HSS8×8×1/2	W12×136	W14×61	W14×398	HSS8×8×1/2	W12×136
5	3.96	W14×74	W14×426	HSS8×8×1/2	W12×152	W14×68	W14×426	HSS8×8×1/2	W12×136
4	3.96	W14×74	W14×455	HSS8×8×1/2	W12×152	W14×68	W14×455	HSS8×8×1/2	W12×136
3	3.96	W14×74	W14×500	HSS8×8×5/8	W12×152	W14×68	W14×500	HSS8×8×1/2	W12×136
2	3.96	W14×74	W14×550	HSS8×8×5/8	W12×152	W14×68	W14×550	HSS8×8×1/2	W12×136
1	3.96	W14×74	W14×550	HSS8×8×5/8	W12×152	W14×68	W14×550	HSS8×8×1/2	W12×152
		قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم مدل طراحی شده با ۸۰ درصد نیرو (Brace 80%)				قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم مدل طراحی شده با ۷۰ درصد نیرو (Brace 70%)			
10	3.96	W14×53	W14×90	HSS6×6×5/8	W10×112	W14×53	W14×90	HSS6×6×1/2	W10×100
9	3.96	W14×53	W14×109	HSS6×6×5/8	W10×112	W14×53	W14×109	HSS6×6×1/2	W10×100
8	3.96	W14×53	W14×145	HSS6×6×5/8	W10×112	W14×53	W14×145	HSS6×6×1/2	W10×100
7	3.96	W14×53	W14×233	HSS7×7×1/2	W10×112	W14×53	W14×233	HSS6×6×1/2	W10×112
6	3.96	W14×53	W14×370	HSS7×7×1/2	W10×112	W14×53	W14×342	HSS6×6×1/2	W10×112
5	3.96	W14×61	W14×398	HSS7×7×1/2	W12×120	W14×61	W14×370	HSS6×6×1/2	W10×112
4	3.96	W14×61	W14×426	HSS8×8×1/2	W12×120	W14×61	W14×398	HSS6×6×1/2	W10×112
3	3.96	W14×61	W14×455	HSS8×8×1/2	W12×120	W14×61	W14×426	HSS6×6×1/2	W10×112
2	3.96	W14×61	W14×500	HSS8×8×1/2	W12×120	W14×61	W14×455	HSS6×6×1/2	W10×112
1	3.96	W14×61	W14×500	HSS8×8×1/2	W12×136	W14×61	W14×455	HSS6×6×1/2	W10×112
		قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم مدل طراحی شده با ۶۰ درصد نیرو (Brace 60%)							
10	3.96	W14×48	W14×82	HSS5×5×1/2	W10×88				
9	3.96	W14×48	W14×99	HSS5×5×1/2	W10×88				
8	3.96	W14×48	W14×132	HSS5×5×1/2	W10×88				
7	3.96	W14×48	W14×211	HSS5×5×1/2	W10×100				
6	3.96	W14×48	W14×311	HSS5×5×1/2	W10×100				
5	3.96	W14×48	W14×342	HSS6×6×3/8	W10×100				
4	3.96	W14×48	W14×370	HSS6×6×3/8	W10×100				
3	3.96	W14×48	W14×398	HSS6×6×3/8	W10×100				
2	3.96	W14×48	W14×426	HSS6×6×3/8	W10×100				
1	3.96	W14×48	W14×426	HSS6×6×1/2	W10×100				

