

New Form of Base Column Connection in Self-Centering Braced Frames without Post-Tensioned Cable

Zahra Hajimohammadi , Ali Biglarifadafan* 

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

ABSTRACT: Conventional column bases are fundamental components of the steel frame. Their behavior has been proved to have a significant effect on the overall building seismic response. Base connections, flexibility largely affect the period of the building and the lateral displacement of the stories. In this research, a new type of connection at the steel column bases has been proposed. The main purpose of proposing this connection is to decrease residual displacement and minimize repair time and disruption of the building serviceability after a strong earthquake. Therefore, to be able to evaluate and compare the seismic performance of this connection with seismic lateral force resisting systems which have developed recently, a self-centering concentrically braced frame (SC-CBF) has been selected from Hasan's research and analyzed and validated. Also, the performance of the system with the proposed column base is evaluated using numerical analysis. The results show that in the proposed system, the amount of residual drift in the structure is equal to $2.2 \times 10^{-14}\%$. Therefore, it can be concluded that the proposed connection satisfies the main purpose of the research well, which is to eliminate residual drifts in the system. They also have higher energy dissipation and stiffness than the SC-CBF system that has been developed so far. While the post-tensioned bars are not used.

Review History:

Received: Jan. 24, 2022
Revised: Nov. 27, 2022
Accepted: Jun. 16, 2023
Available Online: Nov. 02, 2024

Keywords:

Self-Centering Concentrically Braced Frame (SC-CBF)
Steel Base-Plate Connection
Rocking Performance
Durability Evaluation
Residual Displacement

1- Introduction

The results of the recent large earthquakes have shown that the column bases have tolerated significant damages and ruptures due to lateral loads [1]. Therefore, in recent years, researchers have discussed self-centering in structures, in order to minimize the damage at the column bases. Self-centering systems, as systems resistant to lateral load in concrete, steel, and even wooden buildings, have significant advantages over conventional structures due to their high capacity to resist lateral loads and the amount of permanent deformation that is almost zero [2-6]. However, due to the uneconomical of the SC-CBF system in our country, in this research, to develop and improve the seismic performance of column bases in steel structures, an innovative connection at the column bases has been presented.

2- Methodology

In this research, to provide the possibility of evaluating and comparing the seismic behavior of this connection with the recently developed lateral load-resisting resistant systems, first a SC-CBF system from Hassan's research was selected and analyzed, and validated. Numerical simulations are performed using OpenSEES software. After that, the results obtained from the numerical analysis of the SC-CBF system

are compared with the results obtained from the numerical analysis of the proposed column base to improve or not improve the seismic performance of this column base.

3- Results

The results obtained from the validations in this research are shown in Figures 1 and 2.

Also, the results of the evaluation and analysis of the

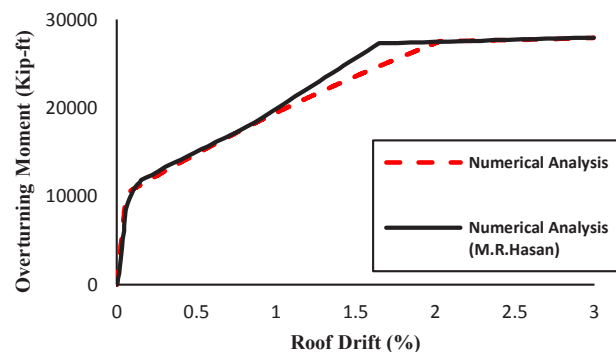


Fig. 1. Comparison and validation of pushover analysis results of SC-CBF system

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

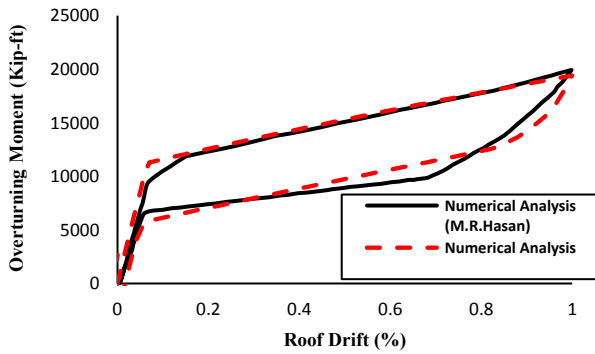


Fig. 2. Comparison and validation of cyclic analysis results of SC-CBF system

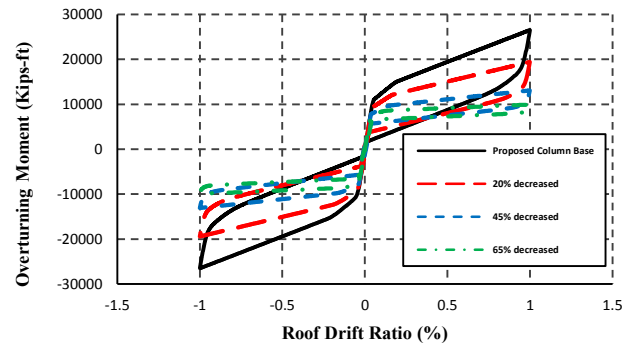


Fig. 4. Comparing the hysteresis behavior of the frame in the case of decreasing the diameter of the wires

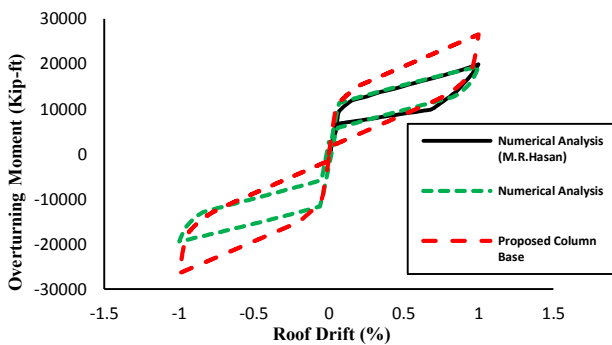


Fig. 3. Comparing the hysteresis behavior of SC-CBF system in Hasan's research and the current research and the proposed column bases

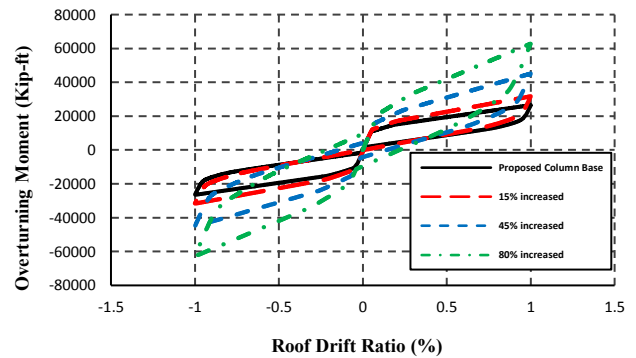


Fig. 5. Comparing the hysteresis behavior of the frame in the case of increasing the diameter of the wires

proposed column base in this research are compared with the validation results and are presented in Figure 3.

In addition, in order to obtain appropriate dimensions for the wires used in the proposed connection, the trial and error method was used and appropriate dimensions were obtained for them. Figures 4 and 5 show the results of the investigation and comparison of different dimensions for these wires.

4- conclusion

Hysteresis evaluation of the proposed connection at the column bases shows that in the presented system, the permanent drift in the structure is equal to $2.2 \times 10^{-14}\%$. Therefore, it can be concluded, that the proposed connection satisfies the main aim of the research, which is to eliminate permanent displacements in the system.

Investigations show that, in addition to the system with the proposed connection at the column bases, it has the ability to self-centering, it also has more energy dissipation and stiffness than the SC-CBF systems that have been developed so far.

The evaluation of the dimensions of the wires used in the proposed connection shows that by increasing the cross-sectional area of the wires, although the energy dissipation and the stiffness of the system increase, but the system loses self-centering performance, and permanent displacements are observed.

When the cross-section of the wires is reduced, the energy dissipation and the stiffness of the system is reduced, but the system still maintains self-centering performance.

The results show that according to the trial and error in selecting the dimensions, the dimensions considered for the triangular plate and the diameter of the wires are the best possible.

References

- [1] J.E. Grauvilardell, D. Lee, J.F. Hajjar, R.J. Dexter, Synthesis of design, testing and analysis research on steel column base plate connections in high-seismic zones, Structural engineering report no. ST-04-02. Minneapolis

- (MN): Department of Civil Engineering, University of Minnesota, (2005).
- [2] G. Akbas, Probabilistic earthquake structural damage assessment of steel special CBF and steel self-centering CBF buildings, Lehigh University, 2012.
- [3] M.M. Garlock, J.M. Ricles, R. Sause, Experimental studies of full-scale posttensioned steel connections, *Journal of Structural Engineering*, 131(3) (2005) 438-448.
- [4] M.M. Garlock, R. Sause, J.M. Ricles, Behavior and design of posttensioned steel frame systems, *Journal of Structural Engineering*, 133(3) (2007) 389-399.
- [5] C.E. Grigorian, M. Grigorian, Performance control and efficient design of rocking-wall moment frames, *Journal of Structural Engineering*, 142(2) (2016) 04015139.
- [6] M. Grigorian, A.S. Moghadam, M. Kamizi, On repairable earthquake resisting archetypes with a view to resiliency objectives and assisted self-centering, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28(7) (2019) e1603.



الگوی جدید اتصال پای ستون در قاب‌های مهاربندی شده مرکزگرا بدون کابل‌های پیش‌تنیدگی

زهرا حاجی‌محمدی، علی بیگلری فدافی*

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲

کلمات کلیدی:

قاب همگرای مرکزگرا (SC-CBF)

اتصال پای ستون فولادی

حرکت گهواره‌ای

ارزیابی دوام

جابجایی ماندگار

خلاصه: پای ستون‌ها در سیستم‌ها فولادی متعارف از اجزای اساسی قاب محسوب می‌شوند. رفتار آن‌ها ثابت کرده است که این اجزای سازه‌ای اثر قابل توجهی بر پاسخ لرزه‌ای کلی ساختمان دارند. انعطاف‌پذیری اتصالات پای ستون، تا حد زیادی زمان تناوب سازه و جابجایی جانبی طبقات را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش، بمنظور توسعه و بهبود عملکرد لرزه‌ای پای ستون‌ها در سازه‌های فولادی، اتصالاتی نوآورانه در پای ستون‌ها ارائه شده است. هدف اصلی از ارائه این اتصال، کاهش جابجایی‌های ماندگار و به حداقل رساندن زمان تعمیر و اختلال در سرویس‌دهی ساختمان پس از زمین‌لرزه‌های قدرتمند است. بنابراین، بمنظور اینکه امکان ارزیابی و مقایسه رفتار لرزه‌ای این اتصال با سیستم‌های مقاوم برابر جانبی که به تازگی توسعه داده شده‌اند فراهم شود، یک نمونه سیستم مهاربندی شده همگرای مرکزگرا (SC-CBF) از پژوهش حسان انتخاب شده و مورد تحلیل و اعتبارسنجی قرار گرفته است. عملکرد سیستم با پای ستون پیشنهادی نیز با استفاده از تحلیل‌های عددی ارزیابی شده است. نتایج بدست آمده از تحلیل عددی اتصال پیشنهادی در پای ستون‌های سازه نشان می‌دهد که در سیستم ارائه شده، میزان جابجایی نسبی ماندگار در سازه برابر با $14\% - 2 \times 10^{-1}$ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد، اتصال پیشنهادی به خوبی هدف اصلی پژوهش که حذف جابجایی‌های ماندگار در سیستم است را ارضا می‌نماید. همچنین، با توجه به اینکه در پای ستون پیشنهادی از کابل‌های پیش‌تنیدگی استفاده نشده است، اما جذب انرژی و سختی بیشتری را نسبت به سیستم‌های SC-CBF که تاکنون توسعه داده شده‌اند، دارا می‌باشد.

۱- مقدمه

توجهی بر پاسخ لرزه‌ای کلی ساختمان دارند. انعطاف‌پذیری اتصالات پای ستون، تا حد زیادی زمان تناوب سازه و جابجایی جانبی طبقات را تحت تاثیر قرار می‌دهد. ساخت پای ستون‌ها در سیستم‌های فولادی متعارف دشوار است و در صورت آسیب به راحتی قابل تعمیر نیستند [۲]. از این رو در سال‌های اخیر پژوهشگران بحث مرکزگرایی در سازه‌ها را مطرح کرده‌اند، تا آسیب را در پای ستون‌ها به حداقل مقدار ممکن برسانند. سیستم‌های مرکزگرا به عنوان سیستم‌های مقاوم در برابر بار جانبی در ساختمان‌های بتنی و فولادی و حتی چوبی، به دلیل ظرفیت بالا در تحمل بارهای جانبی و میزان تغییرشکل‌های ماندگار بسیار اندکی که تقریباً به صفر می‌رسند، دارای مزایای قابل توجهی نسبت به سازه‌های متعارف می‌باشند [۳-۷].

قاب مهاربندی شده همگرای مرکزگرا (SC-CBF) یکی از انواع سیستم‌های سازه‌ای با عملکرد مرکزگرایی است که در اثر بارگذاری جانبی به صورت گهواره‌ای حرکت می‌کند. این سیستم در حالیکه ظرفیت شکل‌پذیری و تغییرشکل را افزایش می‌دهد، سختی بالای قاب‌های مهاربندی شده

پیامد حاصل از زمین لرزه‌های بزرگ اخیر نشان داده است، پای ستون‌ها^۱ در اثر بارهای جانبی، متحمل آسیب‌ها و گسیختگی‌های قابل‌توجهی شده‌اند [۱]. پای ستون‌ها در سیستم‌های مقاوم برابر جانبی متعارف، از یک صفحه ستون^۲ و سخت‌کننده‌هایی تشکیل شده است که با رعایت نکات اجرایی ویژه آماده سازی می‌شوند. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که پای ستون‌های متعارف پس از زمین لرزه‌های شدید، در برابر آسیب‌هایی که به سختی قابل تعمیر بوده دارای حساسیت می‌باشند. این آسیب‌ها شامل خردشدگی بتن، گسیختگی جوش‌ها، شکست میل مهارها و تسلیم صفحه ستون است [۱]. پای ستون‌ها در سیستم‌های فولادی متعارف از اجزای اساسی قاب محسوب می‌شوند. رفتار آن‌ها ثابت کرده است که اثر قابل

- 1 Column Base
- 2 Base Plate

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



را دارند که حاشیه مناسبی از ایمنی را در برابر بروز حالات حدی نامطلوب فراهم نمایند [۱۱]. عملکرد لرزه‌ای استثنایی قاب‌های فولادی همگرای مرکزگرا که به عنوان قاب مهاربندی شده با حرکت گهواره‌ای^۵ (CR-SBF) شناخته می‌شوند، در تعداد زیادی پژوهش آزمایشگاهی گزارش شده است [۸، ۱۰، ۱۲-۱۵]. اما با این حال روش مناسبی برای طراحی این نوع سیستم، در دسترس مهندسين طراحی که قصد استفاده از این سیستم را در سازه‌های خود دارند، نبوده است. از این رو چنسلر و همکاران^۶، برای طراحی SC-CBF ها، روشی براساس تحلیل طیفی که بمنظور در نظر گرفتن اثرات قابل توجه موده‌های بالاتر اصلاح شده، ارائه نموده‌اند. این روش طراحی، برش طبقات و لنگرهای واژگونی را تحت زمین لرزه مبنای طرح میانه^۷ ارزیابی می‌نماید. بطوریکه احتمال کمتری وجود دارد تا حداکثر تقاضای طراحی اعضای سازه‌ای از حالات حدی تعیین شده، فراتر رود. در این پژوهش بمنظور اطمینان از درستی روش ارائه شده، چندین نمونه سیستم SC-CBF در بازه ۴ تا ۱۲ طبقه با استفاده از این روش طراحی شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که روش طراحی پیشنهادی ممکن است تا حدی بیش از حد محافظه کارانه باشد، اما به هدف احتمال پایین آسیب اعضا در سطح خطر DBE دست می‌یابد [۱۶]. بلبو و روک^۸ نوع جدیدی از سیستم مرکزگرا را توسعه داده‌اند. در این سیستم، ستون‌های قاب کمانش ناپذیر بوده و پای این ستون‌ها مفصلی^۹ (SCRC-BRC) می‌باشد. این سیستم در حالیکه آسیب‌های ناشی از تغییرشکل‌های ماندگار و مکانیسم طبقه نرم را محدود می‌نماید، ظرفیت شکل پذیری قابل توجهی را نیز فراهم می‌کند. سیستم SCRC-BRC از تیر، ستون و مهاربند تشکیل شده و این اعضا از یک ستون مرکزی منشعب شده‌اند. در این سیستم ستون‌های کمانش ناپذیر، بجای ستون‌های بیرونی طبقه اول قرار گرفته‌اند. از ستون‌های کمانش ناپذیر و اصطکاک ایجاد شده در المان‌های جذب کننده انرژی در سطح هر طبقه، بمنظور جذب و استهلاک انرژی لرزه‌ای با هدف افزایش عملکرد لرزه‌ای سیستم SCRC-BRC استفاده شده است. کابل‌های پیش تنیده که به صورت قائم در سیستم نصب شده‌اند، مقاومت در برابر لنگر واژگونی را افزایش می‌دهند و موجب می‌شوند، قاب رفتار مرکزگرایی از خود نشان داده و تغییرشکل‌های ماندگار حذف گردد. تکیه‌گاه مفصلی در پای ستون

همگرای متعارف را نیز فراهم می‌آورد [۸]. سیستم‌های SC-CBF بگونه‌ای طراحی شده‌اند که ستون‌ها در سطح مشخصی از بارگذاری لرزه‌ای، قادر می‌باشند از سطح شالوده بلند شده و شروع به حرکت گهواره‌ای نمایند. کابل‌های پیش تنیده که به صورت قائم در امتداد ارتفاع قاب قرار گرفته‌اند، در برابر برخواست ستون‌ها از خود مقاومت نشان داده و نیرویی بازگشتی برای بازگشت سازه به شالوده فراهم کرده و در نتیجه سیستم SC-CBF عملکرد مرکزگرایی از خود نشان می‌دهد [۹]. المان‌های جذب کننده انرژی که در محل انتقال نیروی جانبی از کف دیافراگم به SC-CBF قرار می‌گیرند، در زمان بارگذاری هیستریزیس^۱، تا حدی انرژی جنبشی را جذب و مستهلک می‌نمایند.

در دهه‌های اخیر سیستم‌های SC-CBF با المان‌های اصطکاکی جذب کننده انرژی، بمنظور بهبود عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های مهاربندی شده همگرای متعارف در سازه‌های فولادی در دانشگاه لی‌های^۲ توسعه داده شده‌اند. این سیستم‌ها علاوه بر اینکه سختی قابل توجه قاب‌های مهاربندی شده همگرای متعارف را فراهم می‌سازند، موجب افزایش ظرفیت جابه‌جایی نسبی، پیش از شروع آسیب سازه‌ای و افزایش توان سازه در تحمل تغییرشکل‌های ماندگار می‌شوند [۸]. روک و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۰ پژوهشی تحلیلی و آزمایشگاهی بر روی سیستم‌های SC-CBF انجام دادند و روشی جدید برای طراحی براساس عملکرد در این سیستم‌ها معرفی نمودند. در این پژوهش، چندین قاب با پیکربندی و چیدمان مختلف کابل‌های پیش تنیده و المان‌های جذب کننده انرژی ارائه شده و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان داد، ظرفیت المان‌های جذب کننده انرژی که تابعی از مشخصات اصطکاکی و هندسی سیستم SC-CBF می‌باشد، به عنوان پارامتر اصلی در سیستم‌های سازه‌ای SC-CBF به شمار می‌رود [۸، ۱۰]. ایراد اصلی سیستم‌های CBF، وقوع آسیب‌های سازه‌ای در اثر زمین لرزه مبنای طرح^۴ (DBE) می‌باشد که منجر به خسارت‌های اقتصادی قابل توجهی می‌شود. از آنجایی که سیستم‌های SC-CBF قادر به کاهش این ایرادات می‌باشند، بنابراین در پژوهشی، عملکرد لرزه‌ای این سیستم‌ها با استفاده از روش ارزیابی ایمنی احتمالی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد، طراحی قاب‌های کوتاه مرتبه یا با مرتبه متوسط، این توانایی

5 Controlled Rocking Steel Braced Frame (CR-SBF)

6 Chancellor et al.

7 Median Design Basis Earthquake

8 Blebo & Roke

9 Self-Centering Rocking Core system with Buckling-Restrained Columns (SCRC-BRC)

1 Hysteresis

2 Lehigh University

3 Roke et al.

4 Design Basis Earthquake (DBE)

۲- اعتبارسنجی رفتار سیستم SC-CBF

در این پژوهش شبیه سازی‌های عددی با استفاده از نرم افزار *OpenS-EES* انجام می‌شود. نرم افزار *OpenSEES* یک نرم افزار متن باز و رایگان است و قابلیت تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی سازه‌ها را با استفاده از روش المان محدود دارا می‌باشد. همچنین این نرم افزار، امکانات بسیار زیادی را بمنظور شبیه سازی رفتار غیرخطی ارائه می‌نماید.

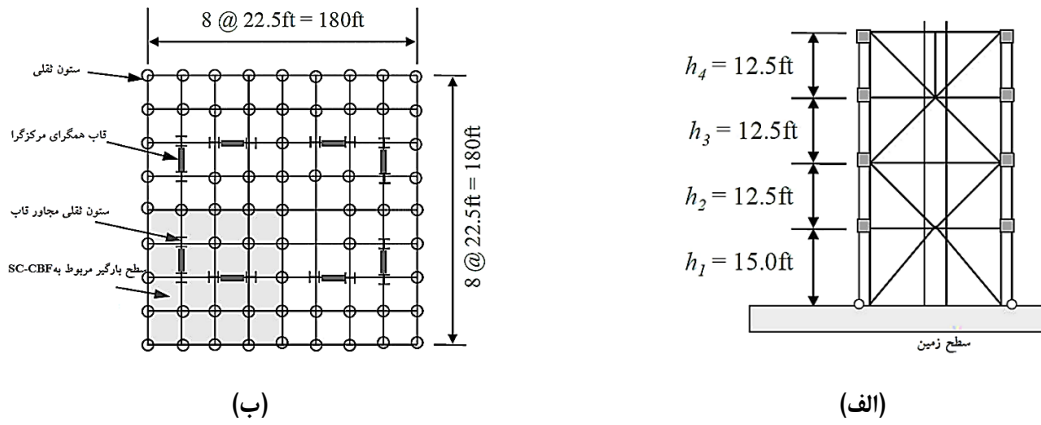
نمونه سازه انتخابی که در این اعتبارسنجی در نظر گرفته شده، از پژوهش حسان^[۱۹] انتخاب شده است. این سازه چهار طبقه بوده و دارای کاربری از نوع اداری می‌باشد و در زمینی با خاکی سخت در ون نوین کالیفرنیا واقع شده است. سیستم‌های SC-CBF، به عنوان تنها سیستم مقاوم در برابر بار جانبی، در این سازه قرار گرفته است. شکل ۱ نمایی از سیستم SC-CBF در این سازه انتخاب شده را نشان می‌دهد. چهار سیستم SC-CBF در راستای هر محور از سازه جانمایی شده است. سازه انتخاب شده بمنظور اعتبارسنجی دارای هشت دهانه با عرض $22/5$ ft در هر راستا می‌باشد. پلان مربوط به نمونه انتخاب شده در پژوهش نیز، در شکل ۱ نشان داده شده است. فاصله مرکز تا مرکز بین ستون‌ها در سیستم SC-CBF و ستون‌های گرانشی برابر $1/5$ ft در نظر گرفته شده است. بنابراین عرض دهانه SC-CBF برای قاب انتخاب شده در این سازه، برابر $19/5$ ft می‌باشد. مهاربندها در سیستم SC-CBF با چیدمان X شکل تنظیم شده‌اند. بگونه‌ایکه انتهای مهاربندهای طبقه اول به پای ستون‌های SC-CBF متصل شده‌اند. همچنین یک ستون متکی که سطح بارگیر گرانشی سیستم SC-CBF را شبیه سازی می‌کند، به ستون‌های گرانشی متصل شده است.

جذب کننده‌های انرژی در هر طبقه بین ستون‌های اصلی قاب و ستون‌های گرانشی قرار گرفته است. یک ستون توزیع کننده بمنظور انتقال نیروی متمرکز از کابل‌های پیش تنیده به مهاربندها، در مرکز یک یا چند طبقه در بالای قاب واقع شده است. همچنین در بین پای ستون‌های SC-CBF تیری توزیع کننده قرار گرفته که بمنظور انتقال برش پایه از ستون برخاسته به ستونی که در تماس با شالوده است، استفاده می‌شود. تمام اعضای قاب و ستون متکی با استفاده از المان‌های الاستیک خطی شبیه سازی شده‌اند. مقاطع مربوط به ستون‌های گرانشی و مشخصات مقطع ستون متکی در جدول ۱ گزارش شده است. همچنین مقاطع استفاده شده در SC-CBF را در شکل ۲ می‌توان مشاهده نمود.

مرکزی و سختی جانبی سیستم، آن را قادر می‌سازد تا توزیع نسبتاً یکنواختی برای جابجایی نسبی بین طبقات داشته باشد. در این پژوهش با استفاده از روش عددی، مجموعه‌ای از ۴۴ شتاب نگاشت در سطح خطر DBE که در آیین نامه FEMA P695 مورد استفاده قرار می‌گیرد، بمنظور ارزیابی عملکرد لرزه‌ای، به چندین SCRC-BRC اعمال شده است. نتایج نشان می‌دهند که سیستم SCRC-BRC دارای جابجایی نسبی یکنواخت بین طبقات، شکل پذیری زیاد و ظرفیت جذب انرژی بالایی بوده و در نتیجه سیستمی مقاوم و کارآمد در برابر زمین لرزه به شمار می‌رود^[۱۷]. از آنجایی که سیستم‌های SC-CBF، نیازمند جزئیاتی خاص می‌باشند، انتظار می‌رود هزینه ساخت این نوع سیستم نیز بیشتر از یک سیستم CBF متعارف باشد. پژوهش‌هایی که اخیراً انجام شده است، نشان دادند که سیستم‌های SC-CBF عملکرد لرزه‌ای بهتری در اثر زلزله مبنای طرح دارند. اما مزیت این سیستم باید از نقطه نظر اقتصادی نیز مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. اینکه آیا هزینه بالای ساخت این سیستم را می‌توان با آسیب‌های کمتری که در طول سرویس‌دهی ساختمان، در اثر زمین لرزه رخ می‌دهند، جبران نمود. هوآنگ و همکاران^۱ با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی، سیستم SC-CBF را از نقطه نظر اقتصادی و هزینه‌های ساخت مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان دادند برای ساختمان‌های ۶ و ۸ طبقه که در معرض خطر لرزه‌ای بالایی قرار دارند، سیستم SC-CBF بطور قابل توجهی از سیستم CBF متعارف، اقتصادی‌تر است. اما در ساختمان ۱۰ طبقه هیچگونه مزیت اقتصادی نسبت به CBF ندارد^[۱۸]. بنابراین با توجه به غیراقتصادی بودن سیستم SC-CBF در کشور ما، در این پژوهش بمنظور توسعه و بهبود عملکرد لرزه‌ای پای ستون‌ها در سازه‌های فولادی، اتصالی نوآورانه در پای ستون‌ها ارائه شده است. هدف اصلی از ارائه این اتصال، کاهش جابجایی‌های ماندگار و به حداقل رساندن زمان تعمیر و اختلال در سرویس‌دهی ساختمان پس از زمین‌لرزه‌های قدرتمند است. بنابراین بمنظور اینکه امکان ارزیابی و مقایسه رفتار لرزه‌ای این اتصال با سیستم‌های مقاوم برابر جانبی که به تازگی توسعه داده شده‌اند فراهم شود، ابتدا یک سیستم SC-CBF از پژوهش حسان^۲ انتخاب شده و مورد تحلیل و اعتبارسنجی قرار گرفته است. پس از آن نتایج بدست آمده از تحلیل‌های عددی سیستم SC-CBF با نتایج بدست آمده از تحلیل‌های عددی پای ستون پیشنهادی مقایسه می‌گردد تا بهبود یا عدم بهبود عملکرد لرزه‌ای این پای ستون حاصل شود.

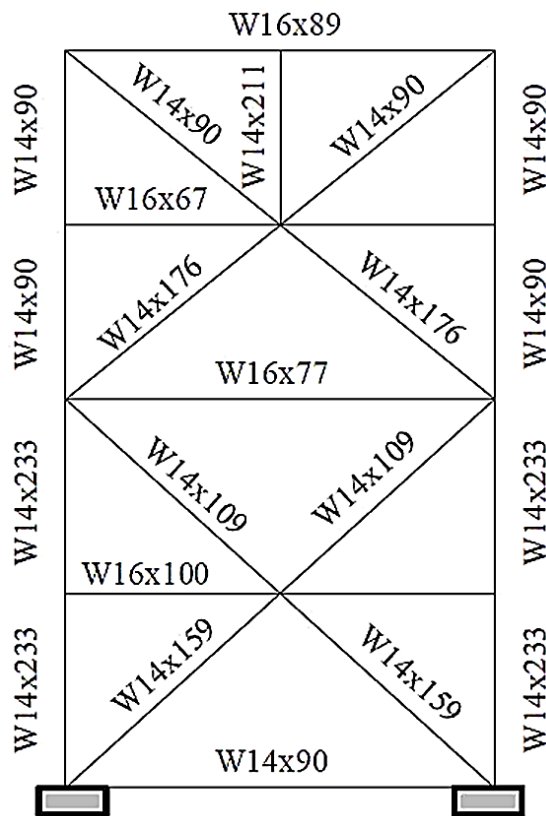
1 Huang et al.

2 Hasan



شکل ۱. نما و پلان نمونه قاب انتخاب شده؛ (الف) نمای قاب، (ب) پلان قاب [۱۹]

Fig. 1. Elevation view schematic and plan of typical frame ; (a) frame elevation view, (b) frame plan



شکل ۲. مقاطع انتخاب شده برای قاب موردنظر [۱۹]

Fig. 2. Selected sections for the typical frame

جدول ۱. خلاصه مقاطع ستون‌های گرانشی مجاور و سطح مقطع ستون متکی [۱۹]

Table 1. Summary of the sections of adjacent gravity columns and the cross section of the leaning column

شماره طبقه	مقاطع ستون گرانشی مجاور	سطح مقطع ستون متکی (in ²)
۱	W8×48	۱۷۶/۴
۲	W8×48	۱۷۶/۴
۳	W8×24	۱۲۹/۲
۴	W8×24	۱۲۹/۲

گرانشی، پای ستون‌های اصلی قاب و انتهای کابل پیش تنیده می‌باشند. تکیه‌گاه در پای ستون متکی از نوع مفصلی بوده که تغییرمکان عمودی و افقی در آن مقید شده اما دوران مقید نشده است.

پای ستون‌های گرانشی مجاور ستون‌های اصلی قاب نیز مفصلی در نظر گرفته شده است. همچنین شرایط مرزی در پای ستون‌های قاب با استفاده از المان‌های compression-only gap شبیه سازی شده است. این المان‌ها از نوع المان‌های با طول صفر می‌باشند. در پای هر ستون دو المان zero length تعریف شده است که یکی از این المان‌ها، شکاف و تماس افقی و دیگری شکاف و تماس عمودی را شبیه سازی می‌کند. مشخصات مصالح در این المان‌ها، در راستایی که بارگذاری شالوده افزایش می‌یابد، سختی مثبت داشته اما در راستای مخالف آن دارای سختی بسیار کوچک می‌باشد. این المان‌ها همزمان با اینکه مقاومت فشاری الاستیک و خطی در پای ستون در تماس با شالوده را فراهم می‌آورند، به پای ستون اجازه بلند شدن از شالوده را نیز می‌دهند. برش پایه در پای ستون، زمانی که ستون در تماس با شالوده است، فراهم می‌شود. شکل ۳ جزئیات مربوط به شرایط مرزی در پای سیستم SC-CBF را نشان می‌دهد.

۲-۴- پیوند بین lean-on column و قاب همگرای مرکزگرا

ستون متکی در سطح کف به هر دو ستون گرانشی مجاور ستون‌های SC-CBF با استفاده از قید equal DOF مقید شده است. equal DOF، جابجایی و دوران گره پیرو را به گره اصلی مقید می‌کند. در نمونه شبیه سازی شده عددی غیرخطی، درجات آزادی جانبی گره‌های ستون گرانشی مجاور به گره‌های ستون متکی مقید شده‌اند.

۲-۱- جذب کننده‌های انرژی

جذب کننده‌های انرژی در این پژوهش از نوع برشی تسلیمی می‌باشند. این جذب کننده‌های انرژی سه عملکرد مهم داشته که به صورت زیر است:

- این جذب کننده‌های انرژی، بار باد و بار لرزه‌ای را از ستون‌های گرانشی و دیافراگم کف به SC-CBF انتقال می‌دهند.
- به SC-CBF اجازه حرکت گهواره‌ای بر روی شالوده بدون بلند شدگی و آسیب دیافراگم را می‌دهند.
- جذب انرژی در قاب را فراهم می‌سازند.

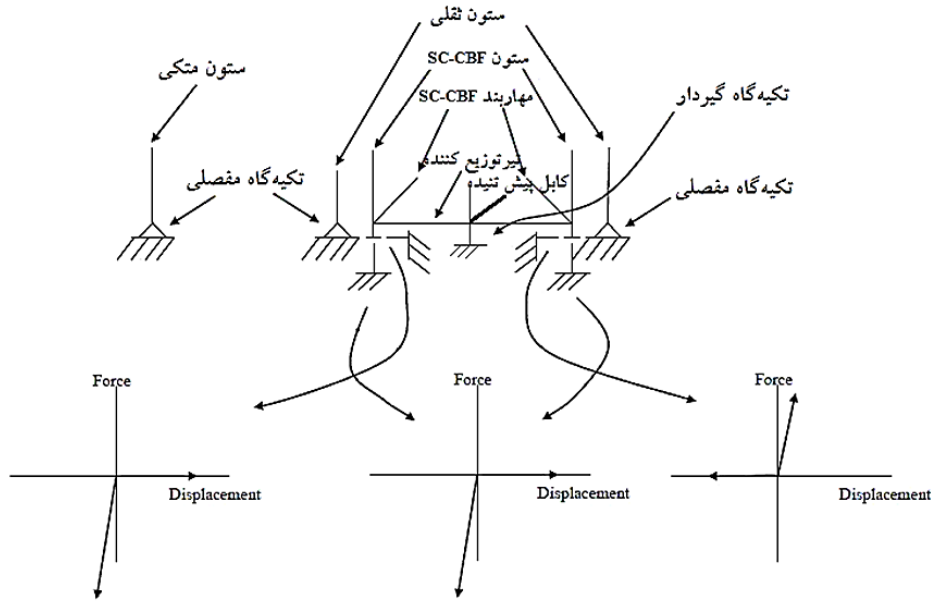
بمنظور شبیه سازی این جذب کننده‌های انرژی از المان‌های تسلیمی در راستای برش استفاده شده است تا عمل جذب انرژی لرزه‌ای در قاب را فراهم آورند.

۲-۲- کابل پیش تنیده

کابل‌های پیش تنیده در قاب SC-CBF با استفاده از المان‌هایی غیرخطی شبیه سازی شده‌اند که دارای ظرفیت کافی در راستای محوری بوده، اما ظرفیت برشی و خمشی ناچیزی دارند. این المان‌ها از گره مرکزی تیر در طبقه بام به شالوده متصل می‌شوند. بمنظور تعریف مصالحی که رفتار کابل را در جهت بار محوری شبیه سازی می‌کند، از یک ماده الاستوپلاستیک دوخطی با مقدار سخت شوندگی کرنشی ۲٪، مدول الاستیسیته ۲۹۷۰۰ kip و تنش تسلیم ۱۲۰ ksi استفاده شده است.

۲-۳- شرایط مرزی

در سیستم SC-CBF، شش قسمت وجود دارد که در آن‌ها شرایط مرزی اعمال می‌شوند. این قسمت‌ها شامل پای ستون متکی، پای ستون‌های



شکل ۳. جزئیات پای ستونها و اتصال کابل پیش تنیده در سیستم SC-CBF [۲۰]

Fig. 3. Details of column bases and post-tensioned bar connection in typical SC-CBF system

شده است. بارهای گرانشی اعمال شده به ستون‌های گرانشی و ستون متکی به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. هیچ بار گرانشی به اعضای اصلی قاب SC-CBF اعمال نمی‌شود زیرا جزئیات اتصال بین دیافراگم کف و SC-CBF مانع از انتقال بار گرانشی از تیرهای کف به SC-CBF می‌شوند.

۲-۷- اثر مرتبه دوم

در این شبیه سازی، اثرات مرتبه دوم کلی و موضعی در نظر گرفته شده

۲-۵- جرم لرزهای

جرم لرزهای مربوط به هر کف در قاب انتخاب شده، در جدول ۲ ارائه شده است. جرم لرزهای هر کف در شبیه سازی عددی، به درجه آزادی جانبی ستون متکی اختصاص داده شده است.

۲-۶- بارهای گرانشی

در نمونه شبیه سازی شده عددی غیرخطی، بارهای گرانشی ناشی از بارهای زنده و مرده طبقات، به ستون‌های گرانشی و ستون متکی اعمال

جدول ۳. خلاصه بارهای گرانشی بر روی ستون‌های گرانشی مجاور [۲۱]

Table 3. Summary of gravity loads on adjacent gravity columns

بار زنده (kip)	بار مرده (kip)	طبقه
۲۲/۴	۴۴/۴	۱
۲۲/۴	۴۴/۰	۲
۲۲/۴	۴۴/۰	۳
۵/۹	۲۵/۹	۴

جدول ۲. جرم‌های لرزهای در سیستم SC-CBF [۲۰]

Table 2. Seismic masses in typical SC-CBF system

جرم لرزهای (kip-sec ² /in)	شماره طبقه
۲/۱۶	۱
۲/۱۴	۲
۲/۱۴	۳
۱/۲۷	۴

گیردار در پای ستون‌ها، انجام شد و مود اول قاب بدست آمد. بخش بعدی نتایج تجزیه و تحلیل را با جزئیات نشان می‌دهد.

۲-۱۰- تحلیل استاتیکی پوش اور

تحلیل استاتیکی پوش اور تا نسبت جابجایی نسبی بام^۳ به میزان ۳٪، بر روی سیستم شبیه‌سازی شده، انجام شده است. این میزان جابجایی نسبی، فراتر از حالت حدی تسلیم کابل پیش تنیده که در نسبت جابجایی نسبی بام در حدود ۱٪ تا ۱/۵٪ رخ می‌دهد، می‌باشد. نتایج بدست آمده از تحلیل به صورت نمودارهای لنگر واژگونی در مقابل درصد جابجایی نسبی بام، ارائه شده‌اند. سپس بمنظور اطمینان از درستی رفتار قاب، نمودار بدست آمده از تحلیل پوش اور با نتایج پژوهش حسان[۱۹] مقایسه گردیده است. این نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. مقایسه نمودارها بیانگر تطابق بسیار مناسبی بین رفتار آنها می‌باشد. درصد خطا در این بررسی ۱۷٪ گزارش شده است.

۲-۱۱- تحلیل استاتیکی هیستریزس

تحلیل هیستریزس، بمنظور تعیین ظرفیت جذب انرژی سیستم، انجام شده است. همانند تحلیل استاتیکی پوش اور، الگوی توزیع نیروی جانبی اعمال شده به قاب، متناسب با شکل مود اول می‌باشد. بارگذاری تا زمانی که قاب تحت ۱٪ جابجایی نسبی بام قرار گیرد، افزایش می‌یابد. در این نقطه بارگذاری تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که قاب، به حالت اولیه پیش از اعمال بار، بازگردد. نتایج پاسخ هیستریزس قاب مورد پژوهش در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین برای اطمینان از صحت و درستی رفتار قاب شبیه سازی شده، نمودار لنگر واژگونی-درصد جابجایی نسبی بدست آمده از شبیه سازی عددی با نتایج بدست آمده از پژوهش حسان[۱۹] مقایسه شد و تطابق مناسبی گزارش گردید. این تطابق بیانگر آن است که، قاب شبیه سازی شده رفتار درستی از خود نشان می‌دهد. مقایسه نمودارها در شکل ۶ نشان داده شده است. درصد خطا در این مقایسه نیز ۵٪ برآورد شده است.

۳- جزئیات سازه‌ای اتصال پیشنهادی

شکل ۷، اتصال پیشنهادی با قابلیت مرکزگرایی در پای ستون را نشان می‌دهد. یک صفحه مثلثی شکل فولادی با ضخامت اندک، با استفاده از جوش به صفحه فولادی که بر روی شالوده قرار داشته، متصل شده است. بر روی این صفحه مثلثی شکل، سه مفتول با قطرهای طراحی شده، در فواصل طراحی شده جوش داده می‌شود. در این اتصال، پای ستون‌ها به

جدول ۴. خلاصه بارهای گرانشی بر روی ستون متکی [۲۱]

Table 4. Summary of gravity loads on the leaning columns

طبقه	بار مرده (kip)	بار زنده (kip)
۱	۶۲۱/۱	۷۸/۳
۲	۶۱۶/۲	۷۸/۳
۳	۶۱۶/۲	۷۸/۳
۴	۳۶۳/۲	۲۰/۷

است. اثرات مرتبه دوم کلی با استفاده از یک تبدیل هندسی corotational لحاظ گردید. تبدیل هندسی corotational، سیستم مختصات هر عضو را، در هندسه تغییرشکل یافته به روز می‌کند. بنابراین، حرکت بدنه صلب را از جابجایی‌ها حذف می‌نماید [۲۲]. اثرات مرتبه دوم، با در نظر گرفتن تعادل حول محور دوران یافته یک المان محاسبه می‌شود. همچنین اثرات مرتبه دوم موضعی با تقسیم بندی هر عضو قاب به چهار المان یا هشت المان (تنها تیرها دارای هشت المان هستند) که دارای تبدیل هندسی corotational هستند، در نظر گرفته می‌شوند.

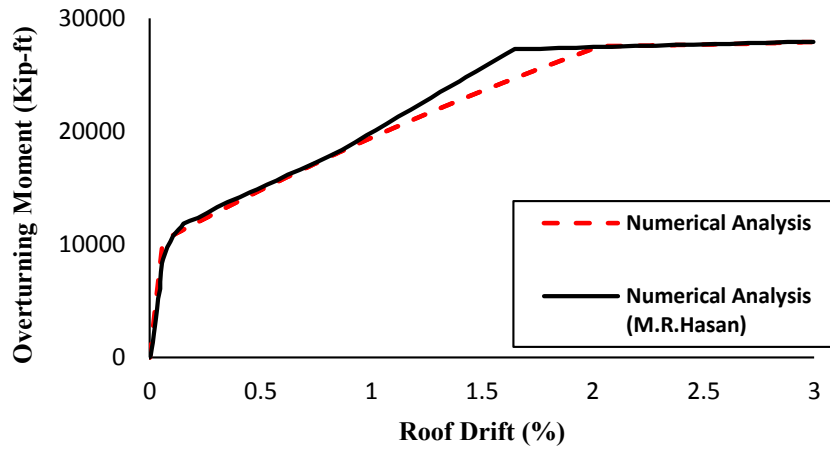
۲-۸- بارگذاری قاب SC-CBF

سه مجموعه بار به سیستم SC-CBF، ستون متکی و ستون‌های گرانشی مجاور، پیش از تحلیل اعمال می‌گردد. ابتدا نیروی پیش تنیدگی، با اعمال بار محوری به کابل پیش تنیده در قاب SC-CBF، در نظر گرفته شده و تا انتهای تحلیل ثابت نگه داشته می‌شود. پس از اعمال نیروی پیش تنیدگی، بار گرانشی به ستون متکی و ستون‌های گرانشی اعمال می‌گردد.

۲-۹- تحلیل استاتیکی غیرخطی

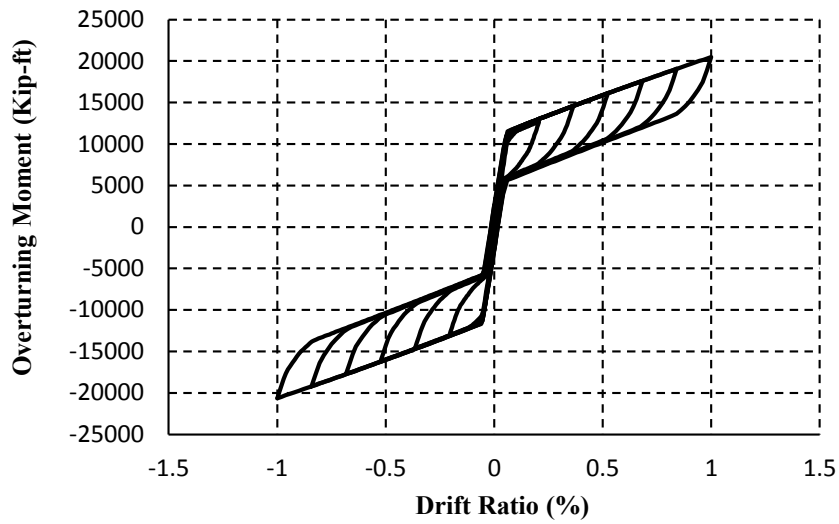
تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی، بمنظور تعیین اینکه SC-CBFها رفتار مورد نظر را تحت بارگذاری نشان می‌دهند، انجام شده است. تحلیل استاتیکی پوش اور^۱ و تحلیل هیستریزس با استفاده از نرم افزار *OpenSEES* [۲۳] انجام شده است. الگوی توزیع بار جانبی مورد استفاده در این تحلیل‌ها، متناسب با مود اول سیستم در تحلیل مودال^۲ می‌باشد. بنابراین بمنظور تعیین مود اول قاب، تحلیل مودال بر روی قابی بدون ستون‌های گرانشی با تکیه‌گاه

- 1 Pushover Analysis
- 2 Modal Analysis



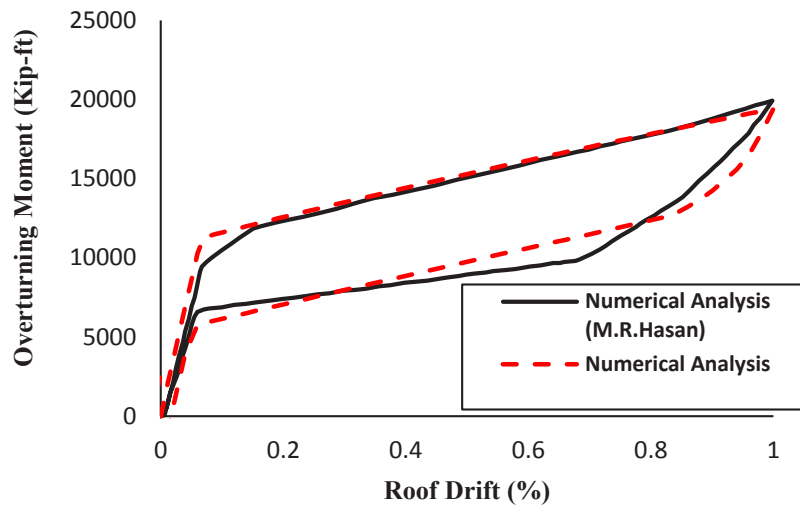
شکل ۴. مقایسه و اعتبارسنجی نتایج تحلیل استاتیکی پوش اور سیستم SC-CBF

Fig. 4. Comparison and validation of pushover analysis results of typical SC-CBF system



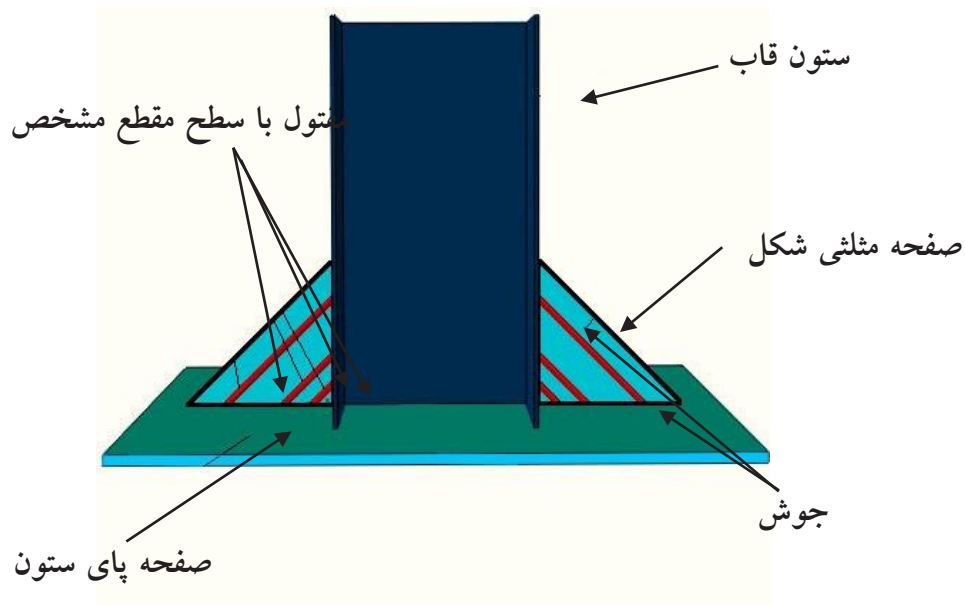
شکل ۵. پاسخ هیستریزیس قاب شبیه سازی شده

Fig. 5. Hysteresis response of the simulated frame



شکل ۶. مقایسه و اعتبارسنجی نتایج تحلیل هیستریزیس سیستم SC-CBF

Fig. 6. Comparison and validation of cyclic analysis results of typical SC-CBF system



شکل ۷. جزئیات اتصال پیشنهادی در پای ستون

Fig. 7. Details of the proposed connection at the column bases

جدول ۵. مشخصات مصالح بکار رفته در شبیه سازی

Table 5. Properties of the materials used in the simulation

ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (ksi)	تنش تسلیم (ksi)	
۰/۲۸	۲۹۰۰۰/۰	۶۰/۰	تیر، ستون و مهاربند
۰/۲۸	۲۹۰۰۰/۰	۵۷/۰	مفتول‌ها

۴-۲- شرایط مرزی

در این نمونه، شرایط مرزی در پنج قسمت از قاب اعمال شده است. در پای ستون متکی، تکیه‌گاه از نوع مفصلی بوده و درجه آزادی دورانی در آن فعال است. همچنین در پای ستون‌های قاب، همانند سیستم SC-compression only، شرایط مرزی با استفاده از المان‌های gap تعریف شده است. علاوه بر این در پای ستون‌های قاب، المان‌های مربوط به پای ستون پیشنهادی، با استفاده از تکیه‌گاه گیردار کاملاً مقید شده‌اند.

۴-۳- تحلیل استاتیکی غیرخطی چرخه ای

بمنظور ارزیابی عملکرد پای ستون پیشنهادی در جذب انرژی لرزه‌ای سازه، یک تحلیل غیرخطی هیستریزس انجام شده است. الگوی توزیع بار جانبی، متناسب با مود اول سازه (ϕ_1) ضربدر جرم لرزه‌ای قاب در هر کف می‌باشد [۲۴]:

$$F_x \propto m_x \phi_{1,x} \quad (1)$$

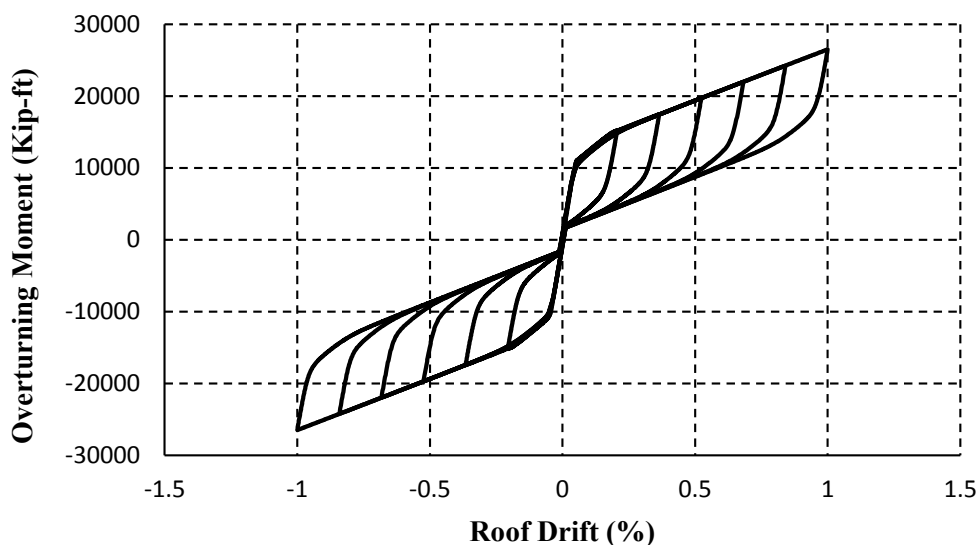
که مقدار بار جانبی در طبقه x جرم لرزه‌ای در سطح طبقه x و شکل مود ارتعاشی اول سازه در طبقه x می‌باشد. شکل موده‌های ارتعاشی قاب شبیه سازی شده، با استفاده از یک تحلیل مودال تعیین شده است. نمودار رفتار هیستریزس قاب شبیه سازی شده با اتصال پیشنهادی در پای ستون، در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۸ می‌توان مشاهده نمود،

صفحه پایینی متصل نمی‌شوند. بنابراین، درجات آزادی در پای ستون‌ها فعال بوده و مقید نمی‌گردد. صفحه مثلی به همراه مفتول‌های آجدار جوش شده روی آن، به ستون متصل شده‌اند. در این اتصال، مفتول‌های قرار گرفته بر روی صفحه مثلی، تا حد قابل توجهی نقش کابل‌های پیش تنیده را ایفا کرده و نیرویی بازگشتی، بمنظور بازگشت قاب به حالت اولیه‌اش را فراهم می‌نمایند. به عبارتی دیگر، این مفتول‌ها با قطرهای مشخص، که در فواصل مشخصی قرار گرفته‌اند، مولفه‌های اصلی این اتصال پیشنهادی بوده و قابلیت مرکزگرایی را فراهم آورده و میزان تغییرشکل ماندگار در قاب را به حداقل مقدار یا حتی صفر می‌رساند.

۴-۴- شبیه سازی عددی

۴-۱- جزئیات شبیه سازی پای ستون پیشنهادی

بمنظور ارزیابی عملکرد پای ستون پیشنهادی در برابر بارهای لرزه‌ای، کابل‌های پیش‌تنیده و المان‌های جذب کننده انرژی از سیستم SC-CBF که بمنظور اعتبارسنجی شبیه سازی شد، حذف گردید. اتصال پیشنهادی با استفاده از المان‌هایی با رفتار تسلیمی، که سطح مقطع مشخصی داشته و در فواصل مشخصی قرار گرفته‌اند، از یک طرف به ستون‌های سیستم و از طرف دیگر به تکیه‌گاه‌ها، متصل شده است. این المان‌ها که با استفاده از المان Truss Element شبیه سازی شده‌اند، بگونه‌ای در اتصال قرار گرفته‌اند که ابتدا المانی که سطح مقطع کوچکتری داشته تسلیم شده و پس از آن المان‌هایی که مقطع بزرگتری دارند، به ترتیب به مرحله تسلیم رسیده و جاری می‌شوند. مشخصات فولاد بکار رفته در شبیه سازی اعضای اصلی سیستم و اتصال پیشنهادی در این پژوهش در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۸. رفتار هیستریزیس قاب شبیه سازی شده با اتصال پیشنهادی در پای ستون

Fig. 8. Hysteresis behavior of the simulated frame with the proposed connection at the column bases

۵- بررسی پارامتر قطر مفتول‌ها در اتصال پیشنهادی

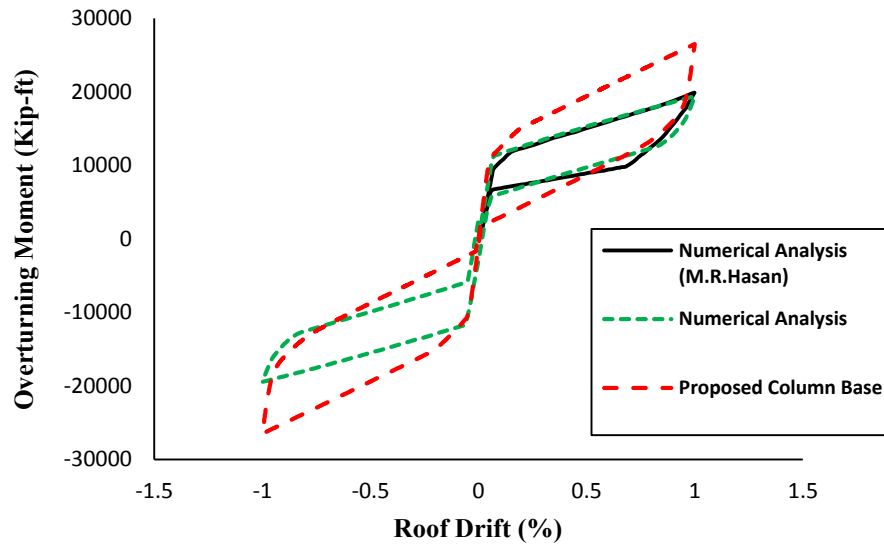
در این بخش، پارامتر قطر مفتول‌های بکار برده شده در اتصال پیشنهادی، با هدف ارزیابی تاثیر آنها در رفتار هیستریزیس سیستم، در نظر گرفته شده است. به این صورت که، شش قطر مختلف برای مفتول‌ها انتخاب گردیده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. ابتدا قطر مفتول‌ها به میزان ۲۰٪، ۴۵٪ و ۶۵٪ کاهش داده شده و سپس تحلیل هیستریزیس، بر روی قاب شبیه سازی شده با پای ستون پیشنهادی انجام گرفته است. نتایج بدست آمده در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. در گام بعدی بررسی تاثیر قطر مفتول‌ها بر رفتار هیستریزیس سیستم، قطر مفتول‌ها به میزان ۱۵٪، ۴۵٪ و ۸۰٪ افزایش یافته و مورد تحلیل واقع شده است. نتایج بدست آمده از این تحلیل‌ها را نیز می‌توان در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ مشاهده نمود.

اتصال پیشنهادی عملکرد بسیار خوبی در فراهم آوردن قابلیت مرکزگرایی دارد. نمودار به صورت پرچمی شکل بوده و جابجایی ماندگار تقریباً برابر با صفر می‌باشد. همچنین با هدف بررسی و ارزیابی میزان جذب انرژی و سختی قاب شبیه سازی شده، چرخه متناظر با جابجایی نسبی ۱٪ انتخاب گردیده و با نمودار هیستریزیس سیستم SC-CBF شبیه سازی شده در پژوهش حاضر و پژوهش حسان مقایسه شده و در شکل ۹ نشان داده شده است. مقایسه سه نمودار بیانگر آن است که اتصال پیشنهادی، به ترتیب به میزان ۱۰۰٪ و ۱۸٪ منجر به افزایش جذب انرژی و سختی در قاب شبیه سازی شده، گردیده است. نمودار سیستم با پای ستون پیشنهادی نشان می‌دهد، میزان جابجایی نسبی ماندگار^۱ در این سیستم، برابر با $2/2 \times 10^{-14}$ می‌باشد. بنابراین می‌توان با استناد به مقدار جابجایی نسبی ماندگار که تقریباً برابر با صفر است نتیجه گرفت، این سیستم به خوبی هدف پژوهش را برآورده می‌سازد.

۵-۱- تحلیل نتایج بررسی تاثیر ابعاد مفتول در رفتار اتصال پای ستون

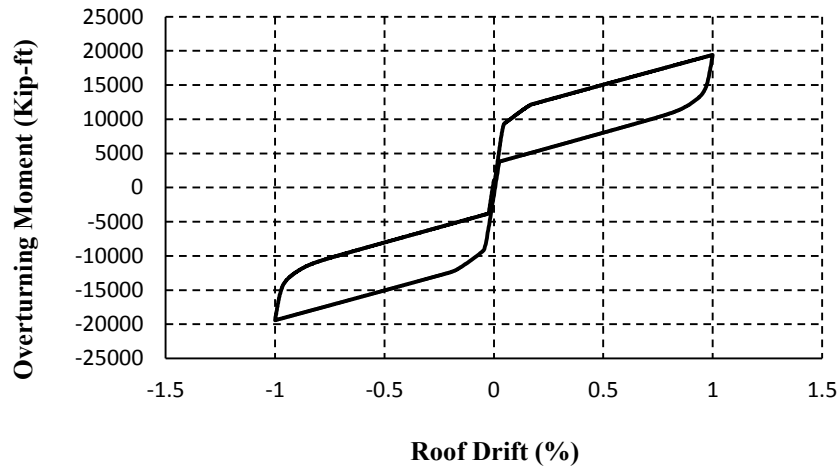
پس از قرارگیری مفتول‌هایی با ابعاد مختلف در پای ستون‌های سیستم، قاب مورد بررسی، تحلیل شد و نتایج آن در بخش قبل ارائه گردید. در این بخش، با هدف ارزیابی تاثیر ابعاد مفتول‌ها در عملکرد لرزه‌ای سازه، نتایج

1 Residual Drift



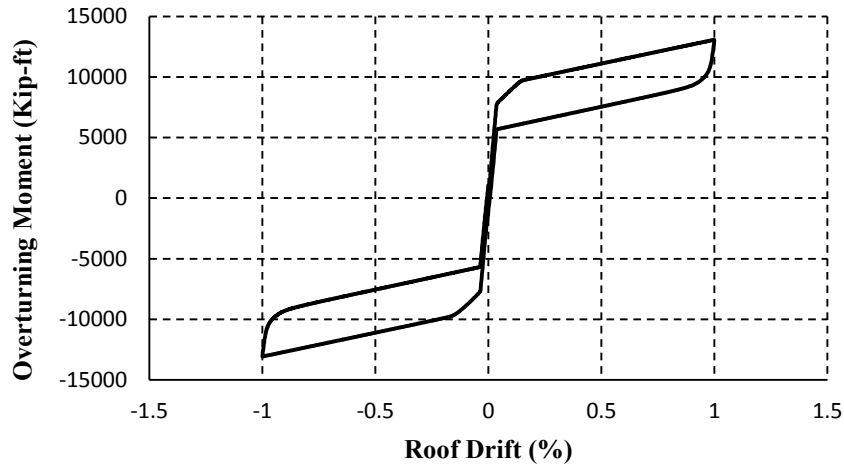
شکل ۹. مقایسه رفتار هیستریزیس سیستم SC-CBF شبیه سازی شده در پژوهش حسان و پژوهش حاضر و قاب شبیه سازی شده با پای ستون پیشنهادی

Fig. 9. Comparing the hysteresis behavior of SC-CBF system in Hasan's research and the current research and the proposed column bases



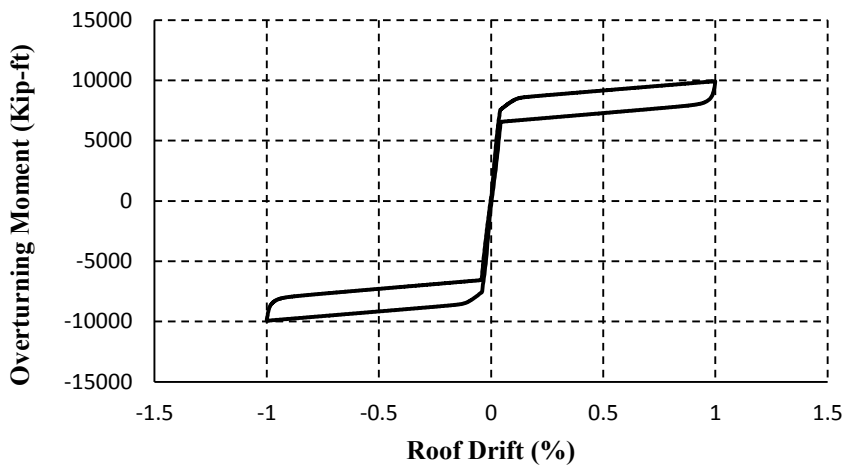
شکل ۱۰. رفتار هیستریزیس قاب با پای ستون پیشنهادی با کاهش قطر مفتولها به میزان ۲۰٪

Fig. 10. Hysteresis behavior of the frame with the proposed column base by decreasing the diameter of the wires by 20%



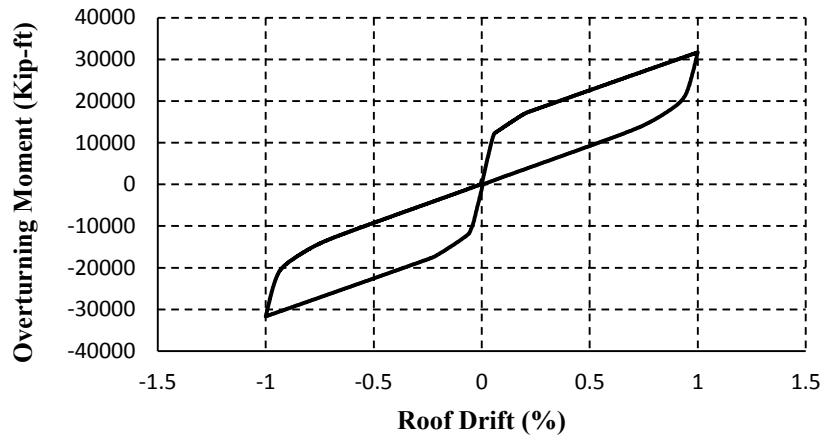
شکل ۱۱. رفتار هیستریزیس قاب با پای ستون پیشنهادی با کاهش قطر مفتولها به میزان ۴۵٪

Fig. 11. Hysteresis behavior of the frame with the proposed column base by decreasing the diameter of the wires by 45%



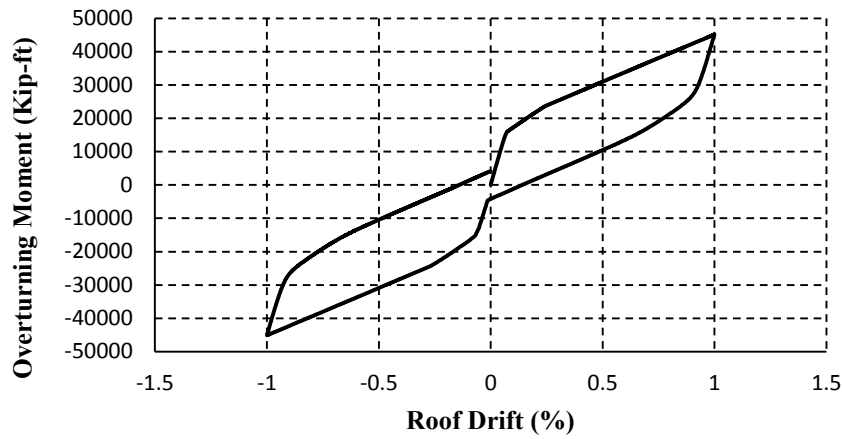
شکل ۱۲. رفتار هیستریزیس قاب با پای ستون پیشنهادی با کاهش قطر مفتولها به میزان ۶۵٪

Fig. 12. Hysteresis behavior of the frame with the proposed column base by decreasing the diameter of the wires by 65%



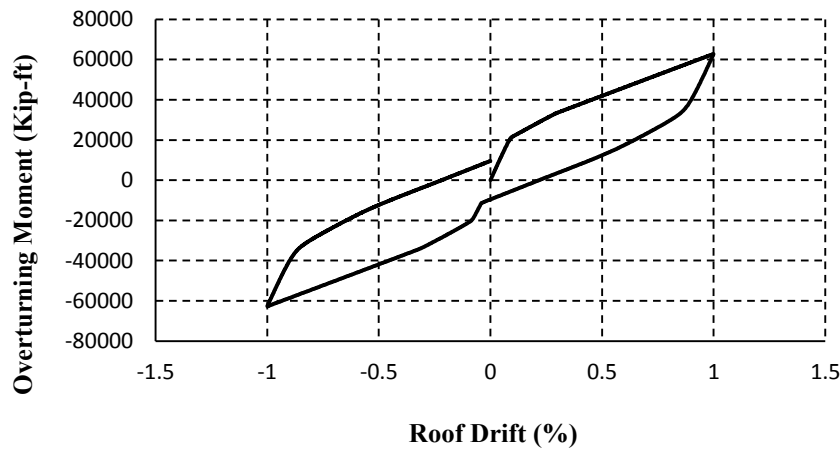
شکل ۱۳. رفتار هیستریزیس قاب با پای ستون پیشنهادی با افزایش قطر مفتول‌ها به میزان ۱۵٪

Fig. 13. Hysteresis behavior of the frame with the proposed column base by increasing the diameter of the wires by 15%



شکل ۱۴. رفتار هیستریزیس قاب با پای ستون پیشنهادی با افزایش قطر مفتول‌ها به میزان ۴۵٪

Fig. 14. Hysteresis behavior of the frame with the proposed column base by increasing the diameter of the wires by 45%



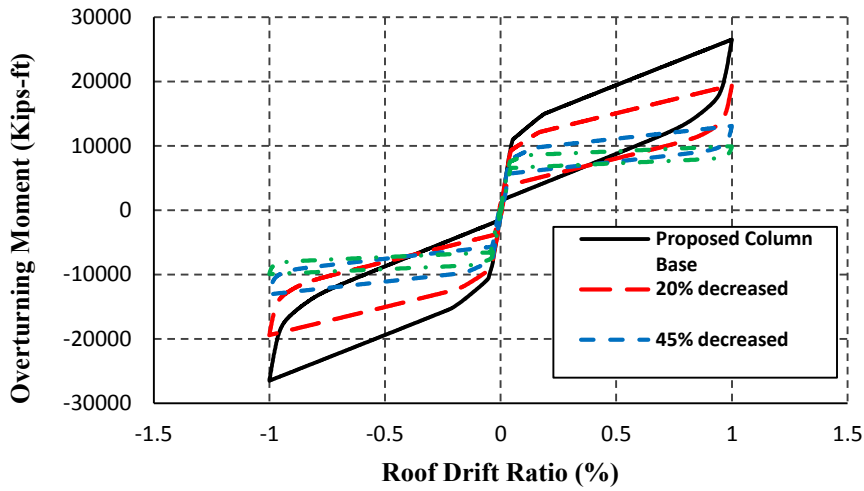
شکل ۱۵. رفتار هیستریزیس قاب با پای ستون پیشنهادی با افزایش قطر مفتول‌ها به میزان ۸۰٪

Fig. 15. Hysteresis behavior of the frame with the proposed column base by increasing the diameter of the wires by 80%

۶- نتیجه‌گیری

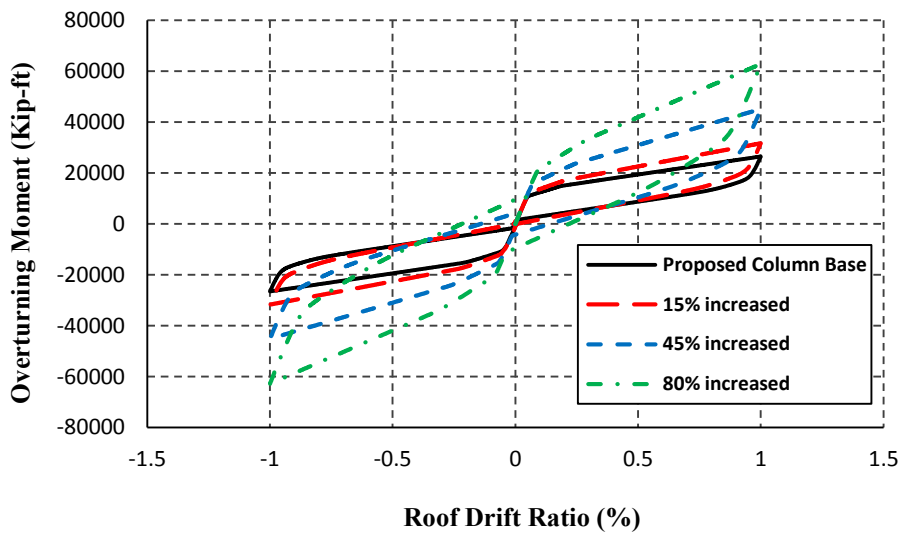
سیستم‌های قاب مهاربندی شده همگرای متعارف به دلیل اقتصادی بودن و سختی بالا، از جمله سیستم‌های مقاوم باربر جانبی مورد پسند در جهان و به خصوص در کشور ما به شمار می‌روند. با این حال این سیستم‌ها، ظرفیت جابجایی نسبی محدودی را پیش از شروع آسیب در اعضای سازه‌ای دارا می‌باشند. در هنگام زمین‌لرزه، قاب‌های مهاربندی شده همگرا، اغلب در معرض نیاز بالای جابجایی نسبی قرار دارند اما از آنجایی که این نیاز با تسلیم یا کماتش مهاربندها تامین می‌شود، پس از زمین‌لرزه جابجایی نسبی ماندگار زیادی در سازه ایجاد شده و وجود این جابجایی‌های ماندگار در سازه ممکن است موجب فروپاشی آن گردد. وقوع فروپاشی یا خسارت عمده در تعدادی از سازه‌ها در یک شهر بزرگ، ممکن است سبب نابسامانی در منطقه شود. در این وضعیت، ساختمان‌هایی که جابجایی‌های ماندگار بزرگی را تجربه می‌کنند، عملاً سرویس‌دهی خود را از دست داده و نیازمند ترمیم سازه‌ای هستند. بهسازی و ترمیم این سازه‌ها، برای زمان زیادی ساختمان را از شرایط سرویس‌دهی خارج می‌کند. همچنین ترمیم خسارت‌های سازه‌ای

بدست آمده در بخش قبل، تحلیل می‌شود و مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در هریک از نمودارهای گزارش شده در شکل ۱۰ تا ۱۵، سطح زیر نمودار محاسبه شده، تا مقدار انرژی جذب شده در سیستم مشخص گردد. همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، با کاهش قطر مفتول‌ها در اتصال پای ستون، به میزان ۲۰٪، ۴۵٪ و ۶۵٪ مقدار انرژی جذب شده به ترتیب ۳۳٪، ۶۵٪ و ۸۱٪ نسبت به نمونه اصلی، کاهش یافته است. همچنین مقایسه نمودارها نشان می‌دهد، در حالتی که قطر مفتول‌ها کاهش می‌یابد، سختی سازه نیز به ترتیب به میزان ۱۶٪، ۲۵٪ و ۳۶٪ کاهش پیدا می‌کند. با افزایش قطر مفتول‌ها به اندازه ۱۵٪، ۴۵٪ و ۸۰٪ میزان انرژی جذب شده در سیستم، به ترتیب به میزان ۲۴٪، ۸۶٪ و بیشتر از ۱۰۰٪ و سختی سیستم نیز به ترتیب به میزان ۶٪، ۴۹٪ و ۹۹٪ افزایش پیدا کرده است. اگرچه در حالت افزایش قطر مفتول‌های اتصال پای ستون، جذب انرژی در سیستم روند افزایشی دارد، اما مشاهده می‌گردد که نمودار اندک اندک فرم پرچمی شکل خود را از دست داده و در سازه جابجایی ماندگار اندکی رخ می‌دهد. مقایسه نمودارها در حالت افزایش قطر مفتول‌ها در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۶. مقایسه رفتار هیستریزیس قاب در حالت کاهش قطر مفتولها

Fig. 16. Comparing the hysteresis behavior of the frame in the case of decreasing the diameter of the wires



شکل ۱۷. مقایسه رفتار هیستریزیس قاب در حالت افزایش قطر مفتولها

Fig. 17. Comparing the hysteresis behavior of the frame in the case of increasing the diameter of the wires

بسیار پرهزینه و وقت‌گیر بوده و اغلب در المان‌هایی که غیرقابل جایگزین هستند، بوقوع می‌پیوندد. مطالعات و پژوهش‌هایی که تاکنون پیرامون بهبود عملکرد لرزه‌ای پای ستون‌ها در سازه‌های فولادی انجام شده است، اغلب مقرون به صرفه نبوده و اجرای آن‌ها در سازه نیازمند نیروهای متخصص می‌باشد. بنابراین وجود چنین شرایطی در سازه‌ها پس از زمین‌لرزه‌های قدرتمند، انگیزه‌ای گردید تا در این پژوهش، بمنظور بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های متعارف، اتصالی جدید در پای ستون‌ها توسعه داده شود. تا علاوه بر افزایش جذب انرژی لرزه‌ای در سیستم‌های سازه‌ای نسبت به سیستم‌های SC-CBF، جابجایی‌های ماندگار را تقریباً به صفر برساند. همچنین با متمرکز کردن آسیب‌ها در یک المان قابل تعویض، مدت زمان مختل شدن سرویس‌دهی ساختمان را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. در پژوهش حاضر، یک نمونه قاب فولادی مهاربندی شده همگرا در نظر گرفته شد و اتصال جدید به پای ستون‌های آن اضافه گردید. سپس به صورت عددی تحلیل شد و بطور کامل اثرات آن بر رفتار لرزه‌ای سیستم، مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج اصلی که در این پژوهش بدست آمده‌اند، به صورت زیر ارائه می‌گردد:

- ارزیابی هیستریزس اتصال پیشنهادی در پای ستون‌های سازه نشان می‌دهد که در سیستم ارائه شده، میزان جابجایی نسبی ماندگار در سازه برابر با $10^{-4} \times 2/2$ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد، اتصال پیشنهادی به خوبی هدف اصلی پژوهش که حذف جابجایی‌های ماندگار در سیستم است را ارضا می‌نماید.
- بررسی‌ها نشان می‌دهند، علاوه بر اینکه سیستم با اتصال پیشنهادی در پای ستون‌ها قابلیت مرکزگرایی دارد، جذب انرژی و سختی بیشتری را نیز نسبت به سیستم‌های SC-CBF که تاکنون توسعه داده شده‌اند، دارا هستند. نتایج بدست آمده بیانگر آن می‌باشند که جذب انرژی سیستم با اتصال پیشنهادی، به میزان ۱۰۰٪ و سختی به میزان ۱۸٪ نسبت به سیستم SC-CBF افزایش پیدا کرده است.
- ارزیابی ابعاد مفتول‌های بکار رفته در اتصال پیشنهادی، نشان می‌دهد که با افزایش سطح مقطع مفتول‌ها به میزان ۱۵٪، ۴۵٪ و ۸۰٪، اگرچه جذب انرژی سیستم به ترتیب به میزان ۲۴٪، ۸۶٪ و بیشتر از ۱۰۰٪ و سختی سیستم به ترتیب ۶٪، ۴۹٪ و ۹۹٪ افزایش می‌یابد، اما سیستم عملکرد مرکزگرایی خود را از دست داده و در آن جابجایی‌های ماندگار مشاهده می‌گردد.

- زمانی که سطح مقطع مفتول‌ها، به میزان ۲۰٪، ۴۵٪ و ۶۵٪ کاهش داده می‌شود، جذب انرژی سیستم ۳۳٪، ۶۵٪ و ۸۱٪ و سختی در سیستم به میزان ۱۶٪، ۲۵٪ و ۳۶٪ کاهش پیدا کرده، اما سیستم همچنان عملکرد مرکزگرایی خود را حفظ می‌نماید.
- نتایج نشان می‌دهند که با توجه به سعی و خطای انجام شده در انتخاب ابعاد، ابعاد در نظر گرفته شده برای صفحه مثلثی شکل و قطر مفتول‌ها، در بهترین حالت ممکن می‌باشد.

۷- پیشنهادها

- در این پژوهش، عملکرد لرزه‌ای سیستم با اتصال پیشنهادی در پای ستون‌ها، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. این بخش، پژوهش‌هایی را معرفی می‌نماید که می‌توانند دانش را در زمینه اتصال پیشنهاد شده در پای ستون‌ها، توسعه دهند.
- این پژوهش، شامل کار آزمایشگاهی و تجربی نمی‌باشد. بنابراین، لازم است بمنظور اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از تحلیل‌های عددی، اتصال ارائه شده در این پژوهش، در آزمایشگاه مناسب مورد آزمایش و بررسی قرار گیرد.
- از آنجایی که اتصال ارائه شده در این پژوهش، اتصالی نوین بوده و روشی بمنظور طراحی آن موجود نمی‌باشد، بنابراین پیشنهاد دیگری که می‌توان در پژوهش‌های آینده به آن پرداخت، بررسی پارامتری و ارائه روشی مناسب برای طراحی آن می‌باشد.
- این پژوهش با هدف بررسی عملکرد اتصال پیشنهادی، تنها در یک نمونه ساختمان مورد ارزیابی قرار گرفت. از این رو، بمنظور دستیابی به تاثیر ارتفاع سازه در عملکرد اتصال پای ستون‌ها، در پژوهش‌های آینده بهتر است ساختمان‌های بلندتری را در نظر گرفت.
- در این پژوهش، تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی فقط بر مبنای مود اول نوسان سازه می‌باشد. بنابراین، پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آتی، بمنظور افزایش دقت نتایج بدست آمده از بررسی‌های عددی، اثرات مودهای بالاتر نیز در تحلیل‌های عددی لحاظ شود.
- در پژوهش حاضر، تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی که در آنها زمین‌لرزه‌ها با سطوح مختلف لحاظ می‌گردد، انجام نشده است. لازم است در پژوهش‌های بعدی، تحلیل‌های دینامیکی انجام شود، تا بتوان دقت نتایج بدست آمده در این پژوهش را بررسی کرد.

- concentrically-braced frames, Lehigh University, 2010.
- [11] N. Rahgozar, N. Rahgozar, A.S. Moghadam, Probabilistic safety assessment of self-centering steel braced frame, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 12(1) (2016) 163-182.
- [12] N. Chancellor, G. Akbas, R. Sause, J. Ricles, E. Tahmasebi, A. Joó, Evaluation of performance-based design methodology for steel self-centering braced frame, in: *Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*, CRC Press, 2012, pp. 757-764.
- [13] N. Chancellor, D. Roke, R. Sause, J. Ricles, N. Gonner, Performance of Steel Self-Centering Braced Frame System During Intense Earthquake and Aftershock Ground Motions, in: *Proceedings of the 8 th Conference on Urban Earthquake Engineering*, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, March, 2011, pp. 7-8.
- [14] M. Eatherton, J. Hajjar, G. Deierlein, H. Krawinkler, S. Billington, X. Ma, Controlled rocking of steel-framed buildings with replaceable energy-dissipating fuses, in: *Proceedings of the 14th world conference on earthquake engineering*, 2008, pp. 12-17.
- [15] N. Gonner, N. Chancellor, R. Sause, J. Ricles, D. Roke, J. Miranda, Design, Experimental Setup, and Testing of Self-Centering Steel Concentrically-Braced Frame Test Structure, *ATLSS Report*, (2010) 10-06.
- [16] N. Chancellor, R. Sause, J. Ricles, Design and validation of steel self-centering concentrically-braced frames, *Proceeding of 16th WCEE*, (2705) (2017).
- [17] F.C. Blebo, D.A. Roke, Seismic-resistant self-centering rocking core system with buckling restrained columns, *Engineering Structures*, 173 (2018) 372-382.
- [18] Q. Huang, M. Dyanati, D.A. Roke, A. Chandra, K. Sett, Economic feasibility study of self-centering concentrically braced frame systems, *Journal of Structural Engineering*, 144(8) (2018) 04018101.
- [19] M. Hasan, Parametric Study and Higher Mode Response Quantification of Steel Self-Centering Concentrically-Braced Frames, University of Akron, 2012.
- [20] N.B. Chancellor, Seismic design and performance of
- [1] J.E. Grauvilardell, D. Lee, J.F. Hajjar, R.J. Dexter, Synthesis of design, testing and analysis research on steel column base plate connections in high-seismic zones, *Structural engineering report no. ST-04-02*. Minneapolis (MN): Department of Civil Engineering, University of Minnesota, (2005).
- [2] J. Borzouie, G. Rodgers, G. MacRae, G. Chase, C. Clifton, A. Moghadam, Base connections seismic sustainability and base flexibility effects, in: *Steel Innovations conference*, Christchurch, New Zealand, 2013
- [3] G. Akbas, Probabilistic earthquake structural damage assessment of steel special CBF and steel self-centering CBF buildings, Lehigh University, 2012.
- [4] M.M. Garlock, J.M. Ricles, R. Sause, Experimental studies of full-scale posttensioned steel connections, *Journal of Structural Engineering*, 131(3) (2005) 438-448.
- [5] M.M. Garlock, R. Sause, J.M. Ricles, Behavior and design of posttensioned steel frame systems, *Journal of Structural Engineering*, 133(3) (2007) 389-399.
- [6] C.E. Grigorian, M. Grigorian, Performance control and efficient design of rocking-wall moment frames, *Journal of Structural Engineering*, 142(2) (2016) 04015139.
- [7] M. Grigorian, A.S. Moghadam, M. Kamizi, On repairable earthquake resisting archetypes with a view to resiliency objectives and assisted self-centering, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28(7) (2019) e1603.
- [8] D. Roke, R. Sause, J.M. Ricles, C.-Y. Seo, K.-S. Lee, Self-centering seismic-resistant steel concentrically-braced frames, in: *Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering*, EERI, San Francisco, April, 2006, pp. 18-22.
- [9] R. Sause, J.M. Ricles, D. Roke, C.-Y. Seo, K.-S. Lee, Design of self-centering steel concentrically-braced frames, in: *Proceedings from the 4th International Conference on Earthquake Engineering*, Taipei, Taiwan, Citeseer, 2006.
- [10] D.A. Roke, Damage-free seismic-resistant self-centering

- 21(10) (2005) 553-570.
- [23] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, The open system for earthquake engineering simulation (OpenSEES) user command-language manual, (2006).
- [24] A.T. Council, U.S.F.E.M. Agency, Quantification of building seismic performance factors, US Department of Homeland Security, FEMA, 2009.
- self-centering concentrically-braced frames, Lehigh University, 2014.
- [21] ASCE, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE7-10, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, VA, 2010.
- [22] Y. Urthaler, J. Reddy, A corotational finite element formulation for the analysis of planar beams, Communications in numerical methods in engineering,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Z. Hajimohammadi, A. Biglari, *New Form of Base Column Connection in Self-Centering Braced Frames without Post-Tensioned Cable*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 56(12) (2025) 1511-1532.

DOI: [10.22060/ceej.2024.21024.7598](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.21024.7598)

