



Fuse performance in steel frames with knee element connections under cyclic loading

A. H. Tanha¹, H. R. Ashrafi^{2*}

¹ Department of Civil Engineering, Kurdistan University, Kurdistan, Iran

² Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Review History:

Received: Feb. 06, 2023

Revised: Mar. 26, 2023

Accepted: Jun. 04, 2023

Available Online: Jun. 14, 2023

Keywords:

Ductility

steel frames with knee element connections

fuse design

connection capacity

cyclic loading

ABSTRACT: This paper describes the development of a ductile fuse system to reduce Seismic demand in steel frames with knee element connections. In this type of structures, connections often require reinforcement to withstand the tensile capacity of the brace to comply with the capacity design process. To overcome this problem, it is necessary to think of a solution to prevent the premature failure of the connection. For this purpose, in this research, different models of ductile fuses consisting of a reduced cross-sectional area are placed on the Knee element brace in a braced frame. The fuses are designed to reduce the tensile capacity of the knee element braces to the capacity of the joints. The results show that the braced frame with a fuse can be used to reduce the seismic load demand to the connections sufficiently, to prevent the strengthening of the connection caused by the application of capacity design principles. It was also observed that the properly designed fuse system in braced frames shows a stable hysteretic response under cyclic loading and maintains sufficient ductility with a reasonable reduction in the compressive strength of the braced members. Also, the results showed that the failure of all samples occurs in the fuse, and as a result, by using the fuse, it is possible to use the full capacity of the connection and brace. Finally, based on the results of the study, the best fuse models that create both Sufficient ductility and compressive strength to an acceptable level were identified for design applications.

1- Introduction

The philosophy of seismic design in most building codes is to provide sufficient strength, stiffness, and ductility to ensure that designed structures meet the following criteria[1]:

Adequate strength and lateral stiffness must be provided to prevent both structural and non-structural damage in the case of a minor earthquake and to prevent structural damage in the case of a moderate earthquake.

In the case of a severe earthquake, sufficient ductility must be provided to prevent building collapse, albeit limited structural damage is permitted.

To accomplish these aims, building codes have proposed various lateral-load-resisting structural systems such as moment-resisting frames (MRFs), concentrically braced frames (CBFs), and eccentrically braced frames (EBFs). MRFs demonstrate stable hysteretic behavior and do not make architectural obstructions. Nevertheless, the relatively low lateral stiffness of MRFs and the dependency of their seismic behavior on the quality of materials and workmanship, particularly at the beam-to-column connections, can lead to undesirable seismic performance[2,3]. CBFs have great lateral stiffness; however, they make architectural limitations and their seismic behavior is severely dependent on the post-buckling behavior of the braces. The strength of the braces

might be considerably reduced after buckling, resulting in an asymmetric cyclic behavior and reduction of systems ductility[4,5]. The performance of EBFs relies on the yield of a ductile link beam; despite creating a stable hysteretic response, it leads to the creation of large deformations in the floor beam, which is not so desirable[6]. To overcome this problem, researchers proposed knee element connections that combine the key features of lateral braced frames and MRF.

2- Methodology

The proposed fuse consists of a reduced cross-section with a gentle angle that is placed at both ends of the knee element brace. The proposed fuse is easy to manufacture can be easily fabricated and installed at the construction site and can be easily created without the help of skilled technicians, which is a significant advantage for the fuse. Figure 1 shows an overview of the geometry and location of the proposed fuse. For simplicity, the fuse is shown for a single-story frame, but it can be used in a multi-story building. This fuse can be made outside the workshop under proper supervision. After making the fuse, connecting the Knee element brace to the gusset plates does not need to be reinforced, which is one of the goals and advantages of making a fuse.

*Corresponding author's email: h_r_ashrafi_d@yahoo.com



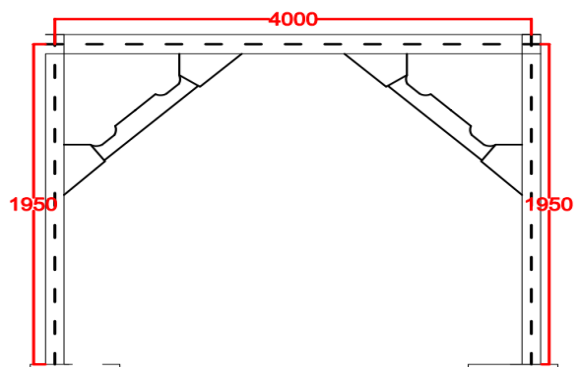


Fig. 1. An overview of the geometry and location of the proposed fuse

3- Results and Discussion

As you can see, the stress concentration happened at the fuse location and the fuses are the first place to yield. It can be seen that the yielding fuses have stable, reliable, and complete hysteretic curves. Under cyclic loading, the fuse can absorb energy with a reasonable reduction in the compressive strength of the bracing members up to the point of failure. So it can be trusted as a deformable fuse with flexible behavior. The important point is that the resistance of the fuse increases after it is yielded. Although this is considered an advantage, it should be considered in the design of connections and bracing elements. The fuse can withstand 3 to 4 times the deformation associated with yielding; Therefore, its ductility can be considered about 4. All the studied models endured at least

as load cycle as the reference test. As expected, the failure of all studied models occurred due to failure in the fuse, which shows the correct design of the fuse. Model a, with four fuses placed at the beginning and end of the knee-braced element, endured more load cycles than models b and c, whose fuses are similarly placed at the beginning and end of the knee-braced element, which is due to the geometry and location of the fuse. After that, Model C endured a decent load cycle. Models d and e were among the models where the fuse was located at the beginning, end, and middle of them and had similar hysteretic behavior. Model f with fuses placed at the beginning, end, and middle compared to the same samples as e and d showed more load cycles and less resistance drop, and this shows the importance of the location of the fuse. Table 1 shows the summary of the hysteretic results of the studied models and shows the maximum displacement, the failure mode, and the maximum and minimum load applied by the frame during the test.

4- Conclusion

In this article, the modeling performance of yielding fuses in different parts of the knee element member in the knee element connections was evaluated. Fuses are designed with a tensile capacity equal to the capacity of the connections to prevent failure of the connection. Based on the modeling research, the following results are obtained:

1- In terms of ductility, the brace equipped with two fuses placed at both ends of the knee element (model a) showed the highest ductility. Models f and c are placed after model a. Also, models b, d and e had similar ductility.

2- As a summary, it can be said that the fuse model used for modeling a, f, and c were the most efficient, unlike models b, d, and e, especially model b, which had poor performance

Table 1. Summary of hysteretic results of studied models

Models	Maximum displacement(m)	Failure mode	Maximum floor load(KN)	Minimum floor load(KN)
Model a	0.06	Fuse failure	249	250
Model b	0.04	Fuse failure	231	226
Model c	0.05	Fuse failure	242	263
Model d	0.04	Fuse failure	213	214
Model e	0.04	Fuse failure	220	220
Model f	0.05	Fuse failure	263	258

mainly due to the improper geometry of the fuse.

References

- [1] A. Asghari, S. Saharkhizan, Seismic design and performance evaluation of steel frames with knee-element connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 154 (2019) 161-176.
- [2] A. ANSI, AISC 341-16: Seismic provisions for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction Inc, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, (2016).
- [3] S.J.V.G.D. Committee, Recommended Specifications and Quality Assurance Guidelines for Steel Moment Frame Construction for Seismic Applications, FEMA, 2000.
- [4] M. Lotfollahi, M. Mofid, On the design of new ductile knee bracing, *Journal of Constructional Steel Research*, 62(3) (2006) 282-294.
- [5] R. Sabelli, Research on improving the design and analysis of earthquake-resistant steel-braced frames, EERI Oakland, CA, USA, 2001.
- [6] M.D. Engelhardt, E.P. Popov, On the design of eccentrically braced frames, *Earthquake spectra*, 5(3) (1989) 495-511.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. H. Tanha, H. R. Ashrafi, *Fuse performance in steel frames with knee element connections under cyclic loading*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(7) (2023) 299-302.

DOI: [10.22060/ceej.2023.22173.7920](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.22173.7920)





عملکرد فیوز در قاب‌های فولادی با اتصالات المان زانو تحت بارگذاری چرخه‌ای

امیرحسین تنها^۱، حمیدرضا اشرفی^{۲*}

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران
۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۰۶
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۳/۲۴

کلمات کلیدی:

شکل‌پذیری
قاب‌های فولادی با اتصالات المان زانو
طراحی فیوز
ظرفیت اتصال
بارگذاری چرخه‌ای

خلاصه: این مقاله توسعه یک سیستم فیوز شکل‌پذیر را به منظور کاهش تقاضای لرزه‌ای در قاب‌های فولادی با اتصالات المان زانو توصیف می‌کند. در این نوع سازه‌ها، اتصالات اغلب به تقویت برای مقاومت در برابر ظرفیت کششی مهاربند برای مطابقت داشتن با فرایند طراحی ظرفیت نیاز دارند. برای غلبه بر این مشکل جهت جلوگیری از شکست زود هنگام اتصال باید چاره‌اندیشی کرد. بدین منظور در این تحقیق مدل‌های مختلفی از فیوزهای شکل‌پذیر متشکل از یک کاهش سطح مقطع، بر روی مهاربند المان زانو در یک قاب مهاربندی شده قرار می‌گیرند. فیوزها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که ظرفیت کششی مهاربندهای المان زانو را به ظرفیت اتصالات کاهش دهند. نتایج نشان می‌دهد که قاب مهاربندی شده با فیوز می‌تواند برای کاهش تقاضای بار لرزه‌ای به اتصالات به‌طور کافی، استفاده شود تا از تقویت اتصال که ناشی از اعمال اصول طراحی ظرفیت است جلوگیری شود. همچنین مشاهده شد که سیستم فیوز با طراحی مناسب در قاب‌های مهاربندی شده، پاسخ هیستریتیک پایداری را تحت بارگذاری چرخه‌ای نشان می‌دهد و شکل‌پذیری کافی را با یک کاهش معقول در مقاومت فشاری اعضای مهاربندی شده حفظ می‌کند. همچنین نتایج نشان داد شکست همه نمونه‌ها در فیوز اتفاق می‌افتد و در نتیجه با استفاده از فیوز امکان استفاده از ظرفیت کامل اتصال و مهاربند فراهم می‌شود. در نهایت بر اساس نتایج مطالعه بهترین مدل‌های فیوز که هم شکل‌پذیری کافی ایجاد می‌کنند و هم مقاومت فشاری را تا حد قابل قبولی حفظ می‌کنند برای کاربردهای طراحی شناسایی شدند.

۱- مقدمه

فلسفه طراحی لرزه‌ای در اکثر آیین‌نامه‌های ساختمان، ارائه مقاومت،

سختی و شکل‌پذیری مطابق با دو معیار زیر است:

- برای جلوگیری از آسیب‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای در زلزله‌های خفیف و برای جلوگیری از آسیب‌های سازه‌ای در زلزله‌های متوسط باید مقاومت و سختی جانبی کافی فراهم شود.
- در صورت وقوع زلزله‌های شدید، شکل‌پذیری کافی برای جلوگیری از ریزش ساختمان باید فراهم شود، البته آسیب‌های سازه‌ای محدود مجاز است.

به منظور دستیابی به این اهداف، آیین‌نامه‌های ساختمان سیستم‌های سازه‌ای مختلف مانند قاب‌های خمشی فولادی^۱ MRFS، قاب‌های

مهاربندی شده هم‌محور^۲ CBF و قاب‌های مهاربندی شده برون‌محور^۳ EBF را پیشنهاد کردند. MRF ها رفتار هیستریتیک پایداری را نشان می‌دهند و انسدادهای معماری ایجاد نمی‌کنند، با این وجود سختی جانبی نسبتاً کم MRF ها و وابستگی رفتار لرزه‌ای آن‌ها به کیفیت مواد و طرز کار، به‌ویژه در اتصالات تیر به ستون، می‌تواند منجر به عملکرد لرزه‌ای نامطلوب شود [۲، ۱]. CBF ها سختی جانبی زیادی دارند، با این حال آن‌ها محدودیت‌های معماری ایجاد می‌کنند و رفتار لرزه‌ای آن‌ها به شدت به رفتار پس از کمانش مهاربندها بستگی دارد. مقاومت مهاربندها ممکن است پس از کمانش به میزان قابل توجهی کاهش یابد که منجر به رفتار چرخه‌ای نامتقارن و کاهش شکل‌پذیری سیستم می‌شود [۴، ۳]. عملکرد EBF ها به تسلیم یک تیر پیوند شکل‌پذیر متکی است؛ که با وجود ایجاد یک پاسخ هیستریتیک پایدار منجر به ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ در تیر کف می‌شود

1 Moment-resisting frames

2 concentrically braced frames
3 Eccentrically Braced Frames

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: h_r_ashrafi_d@yahoo.com

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

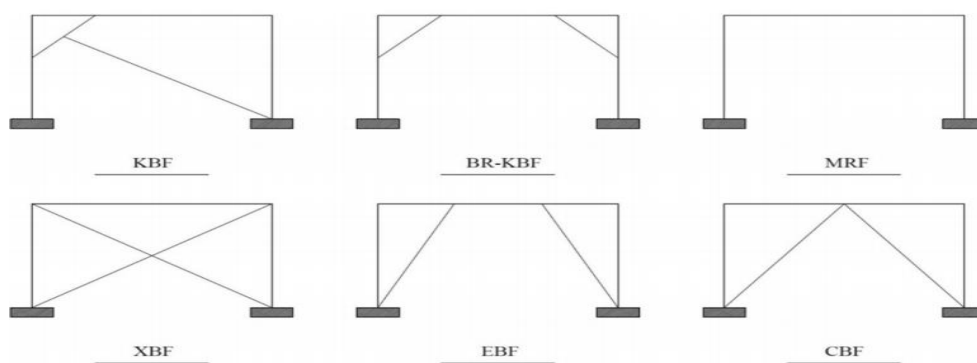


استفاده کردند، به طوری که فعالیت‌های غیر ارتجاعی به عناصر تعیین شده محدود شد. وانگ پاکدی^۷ و همکاران [۱۸] کاربرد المان زانو کماتش مهار شده را در سیستم سازه‌ای قاب خمشی خریایی مهاربندی زانو کماتش مهار شده^۸ BRKB-TMF مورد بررسی قرار دادند. طراحی لرزه‌ای این سیستم به گونه‌ای بود که عناصر زانو کماتش مهار شده می‌توانست انرژی لرزه‌ای را از بین ببرد، در حالی که خریاها و ستون‌های باجان باز در فاز الاستیک باقی می‌مانند. شین^۹ و همکاران [۱۹] یک طرح مقاوم‌سازی لرزه‌ای مؤثر با استفاده از مهاربند زانو کماتش مهار شده BRKBS برای یک ساختمان اسکلت فلزی با طراحی غیر لرزه‌ای ۲ طبقه ایجاد کردند. برای این کار، آن‌ها از ۷۵ نوع مدل تحلیلی BRKB استفاده کردند و عملکرد لرزه‌ای نمونه‌ها را قبل و بعد از مقاوم‌سازی با روش کانتور شکنندگی ارزیابی کردند. لی^{۱۰} و همکاران [۲۰] عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های قاب مقاوم خمشی مهاربند زانو KBRF را ارزیابی کردند. آن‌ها مجموعه‌ای از تست‌های بار چرخه‌ای را روی سیستم‌های SMRF^{۱۱} و KBRF^{۱۲} با مکانیسم‌های کماتش کنترل شده در مهاربندهای زانو انجام دادند. نتایج آزمایش نشان داد که صرف نظر از اینکه کماتش مهاربند زانو در صفحه یا خارج از صفحه رخ داده است، قدرت و ظرفیت اتلاف انرژی KBRFS به طور قابل توجهی افزایش یافته است. علاوه بر این، پیشنهاد می‌شود که مهاربندهای زانو با مکانیسم کماتش کنترل شده در صفحه برای سیستم‌های KBRF مقاوم در برابر نیروی لرزه‌ای به کار گرفته شوند. اصغری و گندمی [۲۱] کاربرد یک قاب فولادی مهاربند زانو جدید KBF^{۱۳} را به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بار جانبی ارزیابی کردند و ضریب کاهش شکل‌پذیری آن RU را با MRF مقایسه کردند. آن‌ها یک رویکرد طراحی مرسوم را بدون در نظر گرفتن هرگونه شرط لرزه‌ای برای مشخصات اعضای قاب اتخاذ کردند. نتایج نشان‌دهنده افزایش قابل توجهی در سختی جانبی قاب‌های فولادی بود که به محل عنصر زانو بستگی داشت. علاوه بر این، نتایج تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی نشان داد که ضرایب کاهش شکل‌پذیری KBFS (RU) معمولاً بیشتر از MRFS است. اصغری و همکاران [۲۲]، یک سری مطالعات پارامتریک در فاز الاستیک بر روی تعداد زیادی قاب نمونه با نسبت‌های مختلف از $\frac{L_k}{L}$ ۰.۱ تا ۰.۲۵ و θ از ۳۰ تا ۶۰ درجه انجام دادند و مقدار ۶۰

که چندان مطلوب نیست [۵]. شکل ۱ سیستم‌های سازه‌ای مختلف مقاوم در برابر بار جانبی را نشان می‌دهد [۶]. برای غلبه بر این مشکل محققان اتصالات مهاربند زانو را پیشنهاد دادند که ویژگی‌های کلیدی قاب‌های مهاربندی شده جانبی و MRF را ترکیب می‌کند. در این سیستم سازه‌ای، تمامی اتصالات تیر به ستون و مهاربند زانو به تیر و ستون ساده است؛ بنابراین به جای اتصال صلب متمرکز در MRF ها، یک اتصال صلب منطقه‌ای با جزئیات ساده‌تر ایجاد می‌کند که نیرو و گشتاور را در یک منطقه‌ی بزرگ‌تر توزیع می‌کند. کاربرد اعضای زانو اولین بار توسط آریستیزابل^۱ [۷] در قاب مهاربندی زانو قابل تعویض DKB^۲ معرفی شد. در این سیستم مقاوم بار لرزه‌ای یک انتهای المان مهاربند مورب به جای محل تقاطع تیر-ستون به یک المان زانو کوتاه متصل است. مهاربند مورب سختی جانبی مورد نیاز را فراهم می‌کند و در طول زلزله‌های متوسط در فاز الاستیک باقی می‌ماند. به هر حال المان زانو برای اتلاف انرژی در طول زلزله شدید به وسیله ایجاد مفاصل پلاستیک خمشی طراحی شده است. تحقیقات بعدی نشان داد که طراحی المان مهاربند مورب تنها برای کشش، به مهاربند لاغر منجر می‌شود که آن را برای کماتش در طول زلزله‌های شدید آسیب‌پذیر می‌سازد. این است دلیل اینکه چرا این سیستم سازه‌ای مجدداً در چندین جنبه به وسیله بلندران^۳ و همکاران (۱۹۹۰) [۸] برای بهبود عملکرد لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفت [۹-۱۴]. مفید و خسروی [۱۵] یک شکل مخصوص از مهاربند زانو قابل تعویض DKB را بررسی کردند و یک تکنیک ساده ارائه دادند که از نمودارها و جداول برای طراحی این نوع سیستم مهاربند زانو استفاده می‌کند. یکی از مهم‌ترین دستاوردها این بود که با فرض عبور عنصر مهاربند مورب از تقاطع تیر-ستون، حداکثر سختی قاب زمانی حاصل می‌شود که عنصر زانو موازی با جهت مورب قاب باشد. با توجه به مطالعات مفید و خسروی، هوانگ^۴ و همکاران [۱۶] برای دستیابی به درک بهتری از رابطه بین عملکرد لرزه‌ای و پارامترهای طراحی لرزه‌ای این سیستم سازه یک تحلیل الاستوپلاستیک با استفاده از روش اجزای محدود انجام دادند. لیلاتاویوات^۵ و همکاران [۱۷] از یک عنصر زانو در یک سیستم سازه‌ای کامپوزیت به نام قاب خمشی مهاربندی شده زانو KBMF^۶ استفاده کردند. آن‌ها از عنصر زانو کوتاه برای محدود کردن حداکثر گشتاور خمشی منتقل شده به ناحیه اتصال تیر-ستون

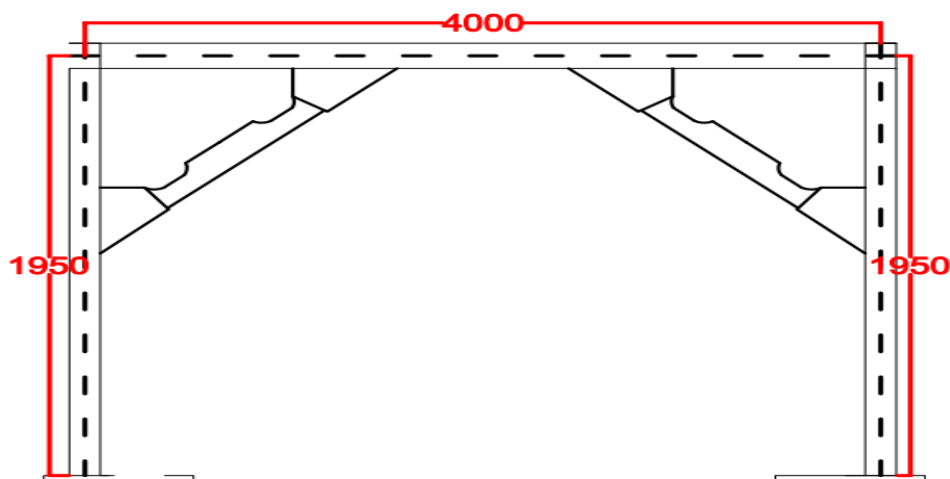
7 Wongpakdee
8 Buckling restrained knee braced truss moment frame
9 Shin
10 Li
11 Special Moment Resisting Frame
12 knee braced moment resisting frame
13 knee bracing steel frame

1 Aristizabal
2 Distributed knee-braced
3 Belendra
4 Huang
5 leelataviwat
6 knee-braced moment frame



شکل ۱. سیستم‌های سازه‌ای مختلف مقاوم در برابر بار جانبی [۶].

Fig. 1. Different structural systems resistant to lateral load [6].



شکل ۲. نمای کلی از هندسه و محل قرارگیری فیوز پیشنهادی

Fig. 2. An overview of the geometry and location of the proposed fuse

۲- متدولوژی

۲-۱- هندسه فیوز

فیوز پیشنهادی شامل یک کاهش سطح مقطع با یک زاویه ملایم است که در دو انتهای مهاربند المان زانو قرار می‌گیرد. فیوز پیشنهادی ساخت آسانی دارد و می‌تواند به راحتی در محل ساخت و ساز، ساخته و نصب شود و بدون کمک تکنسین‌های ماهر می‌توان آن را به راحتی ایجاد کرد که مزیت قابل توجهی برای فیوز است. شکل ۲ نمای کلی از هندسه و محل قرارگیری فیوز پیشنهادی را نشان می‌دهد. برای سادگی، فیوز برای یک قاب یک طبقه

درجه را برای θ و مقدار 0.15 را برای نسبت $\frac{L_k}{L}$ به عنوان مقدار بهینه این پارامترها برای ارائه سختی جانبی کافی و توزیع بهینه نیروها در قاب پیشنهاد کردند. در این مقاله یک سیستم فیوز ساده برای قاب فولادی با اتصالات المان زانو توسعه داده شده است و فیوز به صورت کاهش سطح مقطع در دو انتهای المان زانو ظاهر می‌شود. فیوزهای طراحی شده می‌توانند ضمن حفظ حمل بار و شکل‌پذیری کافی در سیستم قاب مهاربند زانو، تقاضای مقاومت در اتصالات را کاهش دهند.

استاندارد CSAS16-09[۲۳] استفاده شده است، محاسبه می‌شود.

$$C_r = \frac{A_g F_y}{(1 + \lambda^{2n})^{\frac{1}{n}}} \quad (۳)$$

که $n = 1/۳۴$ و $\lambda = \frac{kl}{r} \sqrt{\frac{F_y}{n^2 E}}$ است.

۲-۳- طراحی سیستم فیوز

سیستم فیوز از یک بخش کاهش یافته با طول کافی تشکیل شده است و بر روی المان زانو و در دو انتهای آن قرار می‌گیرد و پس از نصب آن بر روی المان زانو اتصال نیاز به هیچ نوع تقویت ندارد.

اهداف طراحی فیوز عبارت‌اند از:

- بار حمل شده توسط مهاربند درکشش به ظرفیت تئوری اتصال کاهش یابد و از این رو از خرابی اتصال جلوگیری شود.
 - دستیابی به شکل‌پذیری قابل‌قبولی در حدود ۳ تا ۴ برای سیستم با شکل‌پذیری متوسط و ۲ تا ۳ برای سیستم با شکل‌پذیری محدود[۲۶].
- برخلاف کارهای تحقیقاتی قبلی[۲۷]، فیوزهای این تحقیق برای کاهش ظرفیت عضو مهاربند درکشش به ظرفیت فشاری طراحی نشده‌اند؛ زیرا مطالعات اولیه نشان می‌دهد که فیوز طراحی شده برای کاهش ظرفیت کشش به ظرفیت فشاری باعث کاهش جدی سطح مقطع می‌شود. در این مطالعه فیوز به گونه‌ای طراحی شده است که ظرفیتی برابر با ظرفیت اتصال داشته باشد؛ بنابراین مساحت فیوز A_{fuse} از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$A_{fuse} = \frac{T_{rmin}}{\phi F_u} \quad (۴)$$

که ϕ ضریب مقاومت است و مقدار آن برای سازه‌ی فولادی ۰/۹ است و F_u تنش نهایی فولاد است. همچنین T_{rmin} حداقل مقاومت اتصال است که محاسبه می‌شود از:

- ظرفیت سطح خالص مؤثر اعضا
- ظرفیت برشی پیچ‌های اتصال
- ظرفیت باربری اتصال
- ظرفیت شکست اتصال

نشان داده شده است، اما می‌توان از آن در ساختمان چندطبقه استفاده کرد. این فیوز را می‌توان خارج از کارگاه و تحت نظارت مناسب ساخت. پس از ساخت فیوز اتصال مهاربند المان زانو به گاست بلیت‌ها نیازی به تقویت ندارند که این از اهداف و مزیت ساخت فیوز است.

۲-۲- معیارهای طراحی

صفحه گاست پلیم مونتاز شده در قاب به گونه‌ای طراحی شده است که امکان چرخش خارج از صفحه را طبق استاندارد کانادایی S16-09[۲۳] و AISC2016[۲۴] با ایجاد فاصله چرخش آزاد ۱۳ میلی‌متری که برابر با ۲ برابر ضخامت صفحه گاست پلیم است، فراهم کند. ظرفیت کششی عضو مهاربندی شده توسط گسیختگی کششی در مقطع خالص کنترل می‌شود و بر این اساس از رابطه (۱) برای محاسبه استحکام کششی بدون ضریب استفاده می‌شود S16-09[۲۳].

$$T_r = 0.85 A_{ne} F_u \quad (۱)$$

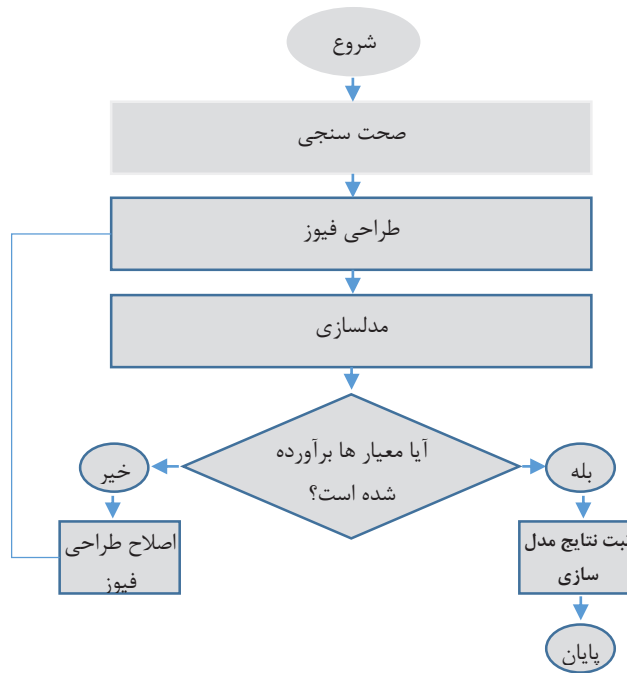
که $A_{ne} = A_n U$ و A_n مساحت خالص عضو زاویه‌ای و U

ضریب تأخیر برشی برای اتصالات با عضو کششی است.

استاندارد CSAS16-09[۲۳] استفاده از ضریب تأخیر برشی ۰/۰۶ را برای اعضای تک زاویه‌ای توصیه می‌کند. برای اعضای زاویه‌دار مجهز شده به فیوز کاهش زیاد مقطع به دلیل استفاده از ضریب تأخیر برشی ۰/۰۶، ممکن است به کم‌مانش زود هنگام فیوز منجر شود. با در نظر گرفتن این موضوع رابطه (۲)[۲۵] برای محاسبه سطح خالص مؤثر استفاده می‌شود.

$$A_{ne} = A_n \left(1 - \frac{e}{l}\right) \quad (۲)$$

در معادله (۲) l ، طول اندازه‌گیری شده از مرکز تا مرکز اولین تا آخرین پیچ اتصال است. A_n مساحت خالص زاویه و e خروج از مرکزیت اتصال است که عمود بر صفحه اتصال به مرکز مقطع عضوی که در برابر نیروی اتصال مقاومت می‌کند، همان‌طور که در AISC2016[۲۴] تعریف شده است، اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از عبارت فوق مقدار A_{ne} بجای ۶۰ درصد A_n حدود ۸۵ درصد است، بنابراین ۴۰ درصد مقاومت در اتصال به دست می‌آید. مقاومت فشاری عضو مهاربندی به وسیله رابطه (۳) که در



شکل ۳. روند انجام مدل سازی

Fig. 3. Modeling process

می شود.

۲-۴- روش مطالعه

نتایج حاصل از تحقیقات قبلی آسیب به قاب‌های مهاربندی شده در طول زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که کماتش موضعی شدید و شکستگی خالص زودرس بادبند در نواحی اتصال به‌طور قابل توجهی باعث کاهش اثربخشی قاب مهاربندی شده در محدوده رفتار غیرکشسان می‌شود. تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که اگر از شکستگی یا پارگی زودرس اتصال مهاربند جلوگیری شود، قاب‌های مهاربندی شده می‌توانند عملکرد لرزه‌ای خوبی ارائه دهند؛ بنابراین نیاز به طراحی یک فیوز در این قاب‌های مهاربندی شده احساس می‌شود. در این مقاله ابتدا نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی که توسط لیلاناویوات و همکارانش [۱۷] مورد بررسی قرار گرفته است، صحت سنجی شد. سپس طراحی فیوز صورت گرفت. بعد از آن فیوز مدل سازی گردید و فیوز پیشنهادی از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان یافته‌های جامعی از رفتار آن ارائه کرد و نتایج آن‌ها با مدل بدون فیوز مقایسه شد. در نهایت بر اساس نتایج مطالعه کارآمدترین الگوی فیوز شناسایی شد. شکل ۳ روند انجام مدل سازی را نشان می‌دهد.

طول فیوز به طوری تخمین زده می‌شود که شکل پذیری ۳ برابری برای سیستم مهاربندی با کرنش در فیوز بیش از ۵ درصد به دست آید. هدف شکل پذیری ۳ برابری مطابق با یک سیستم انعطاف پذیر متوسط است که در [۲۳] CSAS16 تعریف شده است. با فرض اینکه تمام طول فیوز وارد ناحیه پلاستیک شود، طول مورد نیاز فیوز برای دستیابی به شکل پذیری ۳ برابری از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$L_{fuse} = \frac{\Delta_{all} - \varepsilon_y L_{brace}}{\varepsilon_f - \varepsilon_y} \quad (5)$$

که $\varepsilon_y = \frac{F_y}{E}$ ، $\varepsilon_f = 5\%$ و $\Delta_{all} = 3\varepsilon_y L_{brace}$ است. E مدول الاستیسیته است و L_{brace} طول المان زانو است. مقدار ε_f بر اساس تجربه قبلی از آزمایش‌های چرخه‌ای روی اعضای فولادی به‌عنوان ۵ درصد انتخاب شده است [۲۸]. طول کل فیوز محاسبه شده بر ۲ یا ۴ تقسیم می‌شود تا طول فیوز به ترتیب در یک عضو المان زانو مجهز به ۲ تا ۴ فیوز به دست آید. عمق مورد نیاز برای برش عنصر فیوز از سطح فیوز محاسبه


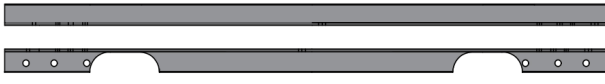




جدول ۱. مشخصات سطح مقطع عناصر قاب و ویژگی مصالح

Table 1. Characteristics of the cross-section of frame elements and characteristics of materials

مقطع	H(mm)	b(mm)	tf(mm)	tw(mm)	L(mm)
ستون	۲۵۰	۲۵۰	۹	۱۴	۱۹۵۰
تیر	۲۵۰	۱۲۵	۶	۹	۴۰۰۰

جدول ۲. طبقه‌بندی برنامه مدل‌سازی

Table 2. Modeling program classification

نام مدل	انواع مدل	ملاحظات
a		فیوز در ابتدا و انتها، روی هر دو بال (سیستم ۲ فیوز)
b		فیوز در ابتدا و انتها، روی بال پیچ شده (سیستم ۲ فیوز)
c		فیوز در ابتدا و انتها، روی بال پیچ نشده (سیستم ۲ فیوز)
d		فیوز در ابتدا، انتها و وسط، روی هر دو بال (سیستم ۴ فیوز)
e		فیوز در ابتدا، انتها و وسط، روی بال پیچ شده
f		فیوز در ابتدا، انتها و وسط، روی بال پیچ نشده (سیستم ۴ فیوز)

۲-۵- مشخصات هندسی

برای المان زانو از نبشی ۶۵×۶۵×۷ با طول ۹۴۵ میلی‌متر مشابه با نمونه آزمایشگاهی KBMF-1 از آزمایش لیلاتاویوات و همکارانش [۱۷] استفاده شده است. همچنین مشخصات هندسی تیر و ستون در جدول ۱ آورده شده است. جدول ۲ برنامه مدل‌سازی را طبقه‌بندی می‌کند. در این

مدل‌سازی مدل‌های عددی از نظر موقعیت قرارگیری فیوز به دودسته کلی تقسیم می‌شوند دسته اول مدل‌هایی هستند که فیوز آن‌ها در ابتدا و انتهای مهاربند زانو قرار گرفته است و دسته دوم مدل‌هایی با فیوزهای قرار گرفته در ابتدا، وسط و انتها هستند. همچنین در هر دسته فیوزها از نظر موقعیت قرارگیری روی بال‌های المان مهاربند زانو به سه بخش تقسیم می‌شوند

و همکارانش [۱۷] برای تأیید نتایج مدل‌سازی المان محدود (FE) انتخاب شده است. لیلاتاویوات و همکاران از یک عنصر زانو در یک سیستم سازه‌ای کامپوزیت به نام قاب خمشی مهاربندی شده زانو KBMF استفاده کردند. آن‌ها از عنصر زانو کوتاه برای محدود کردن حداکثر گشتاور خمشی منتقل شده به ناحیه اتصال تیر-ستون استفاده کردند، به طوری که فعالیت‌های غیر ارتجاعی به عناصر تعیین شده محدود شد. شکل ۶ نمونه آزمایشگاهی KBMF-1 را نشان می‌دهد. تاریخچه بارگذاری مطابق با [۲۴] AISC341-16 در جدول ۳ ارائه شده است. شکل ۷ حلقه‌های هیسترتیک قاب را تحت بارگذاری جانبی در آزمایشگاه و همان قاب را که توسط آباکوس مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل شده است، نشان می‌دهد. مقایسه بین منحنی‌ها صحت مدل‌سازی را تأیید می‌کند. پس از تأیید نتایج نرم‌افزار برای مدل نمونه، مدل‌های عددی دیگر شبیه‌سازی شده و برای بررسی رفتار فیوز پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۲- مدل‌سازی و رفتار کلی

شکل ۸ تصویری از محل واماندگی و تمرکز تنش را در مدل‌ها نشان می‌دهند. تصاویر برای چرخه آخر بارگذاری ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تمرکز تنش‌ها در محل فیوز اتفاق افتاده و فیوزها اولین جایی هستند که تسلیم می‌شوند. شکل ۹ رفتار هیسترتیک هر شش مدل عددی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد فیوزهای تسلیمی دارای منحنی‌های هیسترتیک پایدار، قابل اعتماد و کامل هستند. تحت بارگذاری چرخه‌ای، فیوز می‌تواند انرژی را با کاهش معقول در مقاومت فشاری اعضای مهاربندی تا نقطه گسیختگی جذب کند؛ بنابراین می‌توان به آن به‌عنوان یک فیوز تغییر شکل‌دهنده با رفتار انعطاف‌پذیر اعتماد کرد. نکته مهم این است که پس از تسلیم مقاومت فیوز افزایش می‌یابد. اگرچه این یک مزیت محسوب می‌شود، اما باید در طراحی اتصالات و عناصر مهاربندی مورد توجه قرار گیرد. فیوز می‌تواند ۳ تا ۴ برابر تغییر شکل مربوط به تسلیم را تحمل کند؛ بنابراین شکل‌پذیری آن را می‌توان حدود ۴ در نظر گرفت. تمامی مدل‌های مورد مطالعه حداقل به اندازه آزمایش مرجع چرخه بارگذاری را تحمل کردند. همان‌طور که انتظار می‌رفت شکست تمامی مدل‌های مورد مطالعه به دلیل خرابی در فیوز رخ داد که این طراحی صحیح فیوز را نشان می‌دهد. مدل a با چهار فیوز قرار گرفته در ابتدا و انتهای المان مهاربند زانو چرخه بارگذاری بیشتری نسبت به مدل‌های b و c که فیوز آن‌ها به‌طور مشابه در ابتدا و انتهای المان مهاربند زانو قرار گرفته است تحمل کرد که این

که همین موضوع موجب تغییر هندسه و تعداد فیوزها قرار گرفته روی المان مهاربند زانو شده است. در شکل ۴ مدل‌های عددی و مشخصات آن‌ها نمایش داده شده است.

۲-۶- خواص مواد

اعضای مهاربندی از فولاد سازه‌ای ST37 با تنش تسلیم 235 MPa ، تنش نهایی 360 MPa ، وزن واحد 7850 کیلوگرم بر مترمکعب، مدول الاستیسیته $5e2 \text{ MPa}$ ، نسبت پواسون $0/3$ ، کرنش تسلیم $3-1/e2$ و کرنش نهایی $0/2$ ساخته شده‌اند.

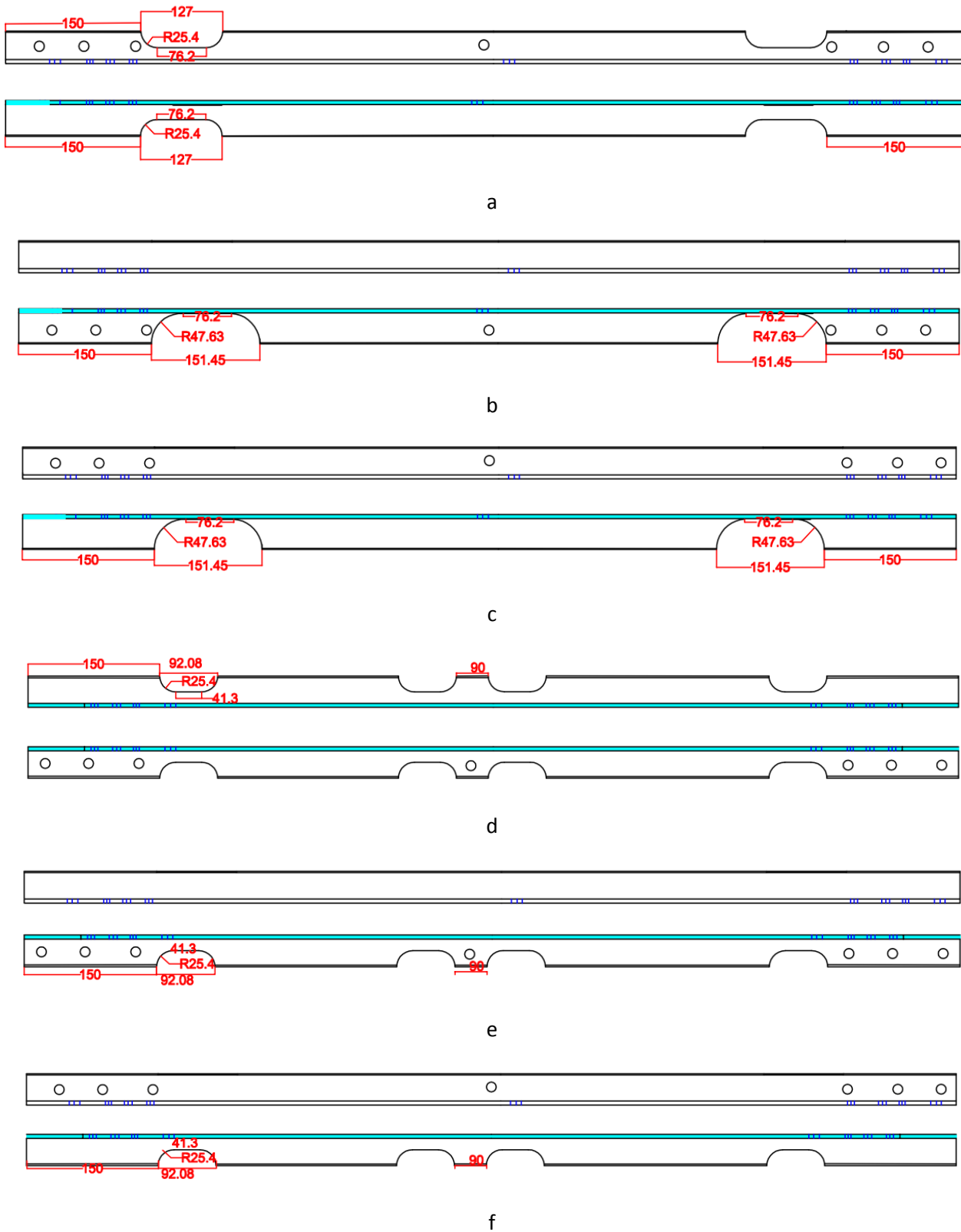
۲-۷- مدل‌سازی عددی

برای بررسی عملکرد فیوز پیشنهادی از نرم‌افزار المان محدود (Abaqus) استفاده شد. برای مدل‌سازی تمامی اعضای مهاربندی از المان توپر Solid با مشخصه C3D20 استفاده شده است. هر المان دارای ۲۰ گره و سه درجه آزادی انتقالی است. در اجزای محدود برای المان‌های چهارگوش یا درواقع مکعبی از توابع شکل درجه ۲ استفاده می‌شود. نرم‌افزار آباکوس برای حل انتگرال‌گیری از روش عددی گوس استفاده می‌کند. در روش عددی گوس در المان محدود درواقع برای حالت توابع شکل مربعی چندین نقطه در وجه المان در نظر گرفته می‌شود و در آن نقاط به‌صورت عددی انتگرال‌ها حل می‌شود. المان C3D20 (C مخفف continue که برای المان solid یا همان توپر استفاده می‌شود، 3D به معنای سه‌بعدی بودن است و ۲۰ تعداد نودها را نشان می‌دهد) هم بیانگر همین موضوع است. این المان توانایی اعمال رفتار غیرخطی مصالح را دارد و قادر به منظور کردن کرنش‌ها و تغییر شکل‌های بزرگ است. مش‌ها به‌صورت مربعی و منظم با سایز 5×5 سانتی‌متر به نرم‌افزار معرفی شدند و این سایز به‌گونه‌ای انتخاب شد تا در حین تحلیل هم سرعت تحلیل نرم‌افزار بالا باشد و هم اینکه دقت تحلیل از دقت خوبی برخوردار باشد. همچنین در این مطالعه نمودار تنش-کرنش مصالح مطابق اطلاعات در دسترس مقاله لیلاتاویوات و همکارانش [۱۷] به‌صورت نمودار دوخطی به نرم‌افزار معرفی گردید. شکل ۵ نمای کلی از مش بندی یک نمونه از قاب فولادی با مهاربند المان زانو مجهز به فیوز (model a) را نشان می‌دهد.

۳- بحث و آنالیز نتایج

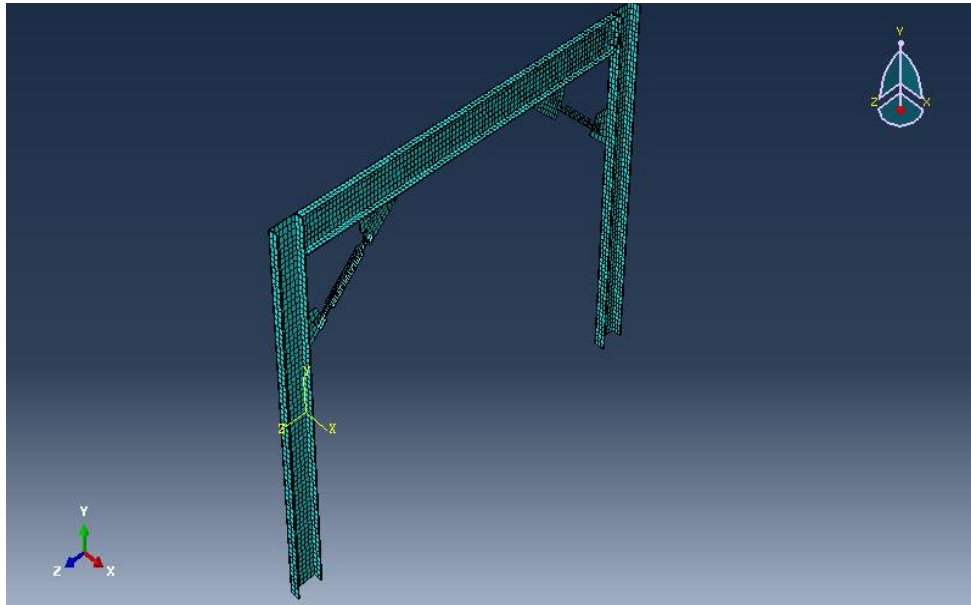
۳-۱- صحت سنجی نتایج المان محدود

در این مطالعه نمونه آزمایشگاهی KBMF-1 از آزمایش لیلاتاویوات



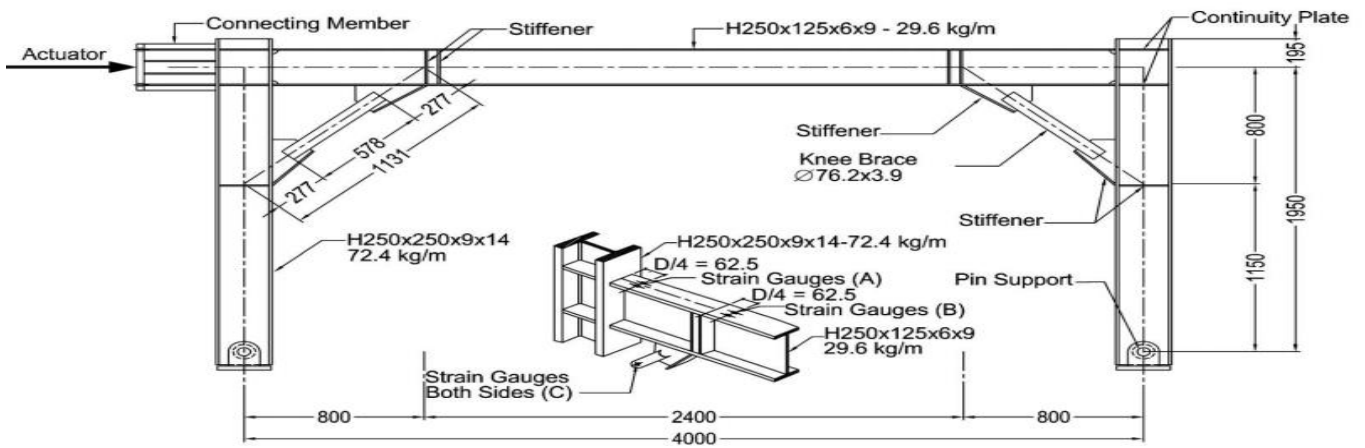
شکل ۴. مدل‌های عددی و مشخصات هندسی فیوزهای قرار گرفته بر روی المان زانو

Fig. 4. Numerical models and geometric characteristics of fuses placed on the knee element



شکل ۵. نمای کلی از مش بندی یک نمونه از قاب فولادی با مهاربند زانو مجهز به فیوز

Fig. 5. An overview of the meshing of a sample of a steel frame with a knee element brace equipped with a fuse



شکل ۶. نمونه آزمایشگاهی KBMF-1 از آزمایش لیلاتاویوات و همکارانش [۱۷].

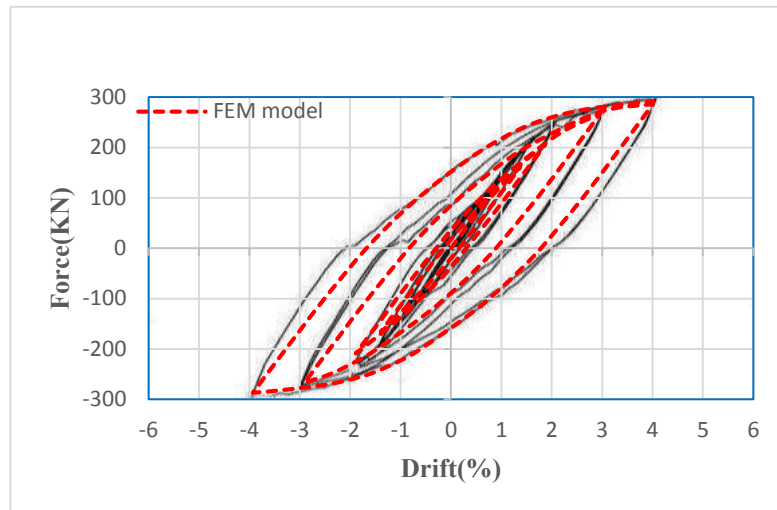
Fig. 6. Laboratory sample of KBMF-1 from the experiment of leelataviwat et al [17].

جدول ۳. تاریخچه بارگذاری مطابق [۲۴] AISC341-16.

Table 3. Loading history according to AISC341-16 [24].

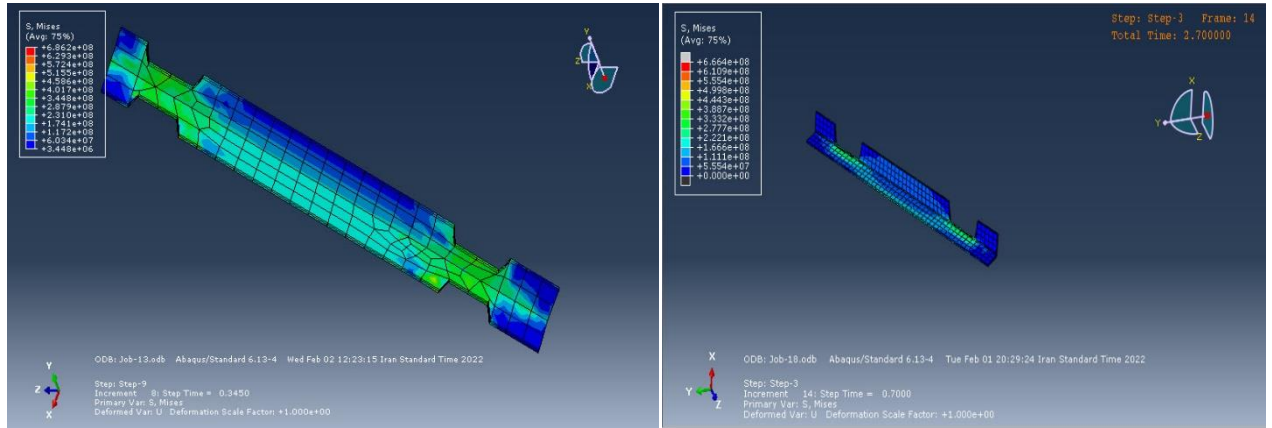
تعداد چرخه‌ها	زاویه دریفت (rad)
۶ چرخه	۰/۰۰۳۷۵
۶ چرخه	۰/۰۰۵
۶ چرخه	۰/۰۰۷۵
۴ چرخه	۰/۰۱
۲ چرخه	۰/۰۱۵
۲ چرخه	۰/۰۲
۲ چرخه	۰/۰۳
۲ چرخه	۰/۰۴

ادامه دهید افزایش بارگذاری را با ۰/۰۱ rad و با ۲ چرخه بارگذاری در هر گام



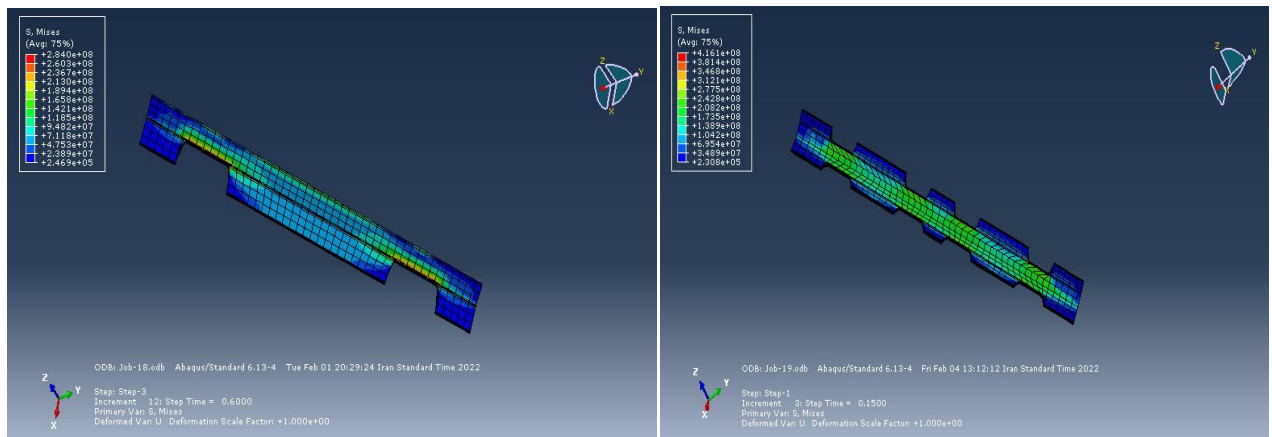
شکل ۷. صحت سنجی و کالیبراسیون.

Fig. 7. Validation and calibration.



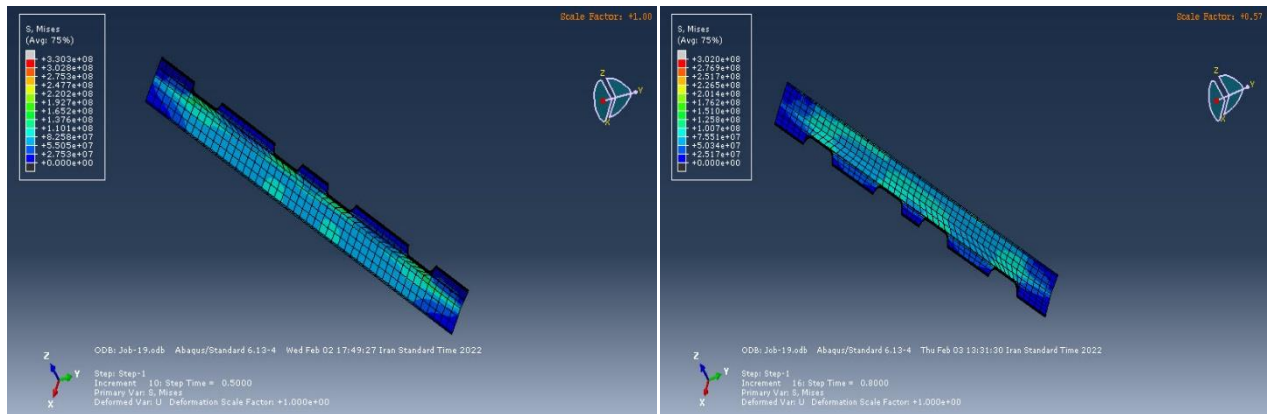
a

b



c

d



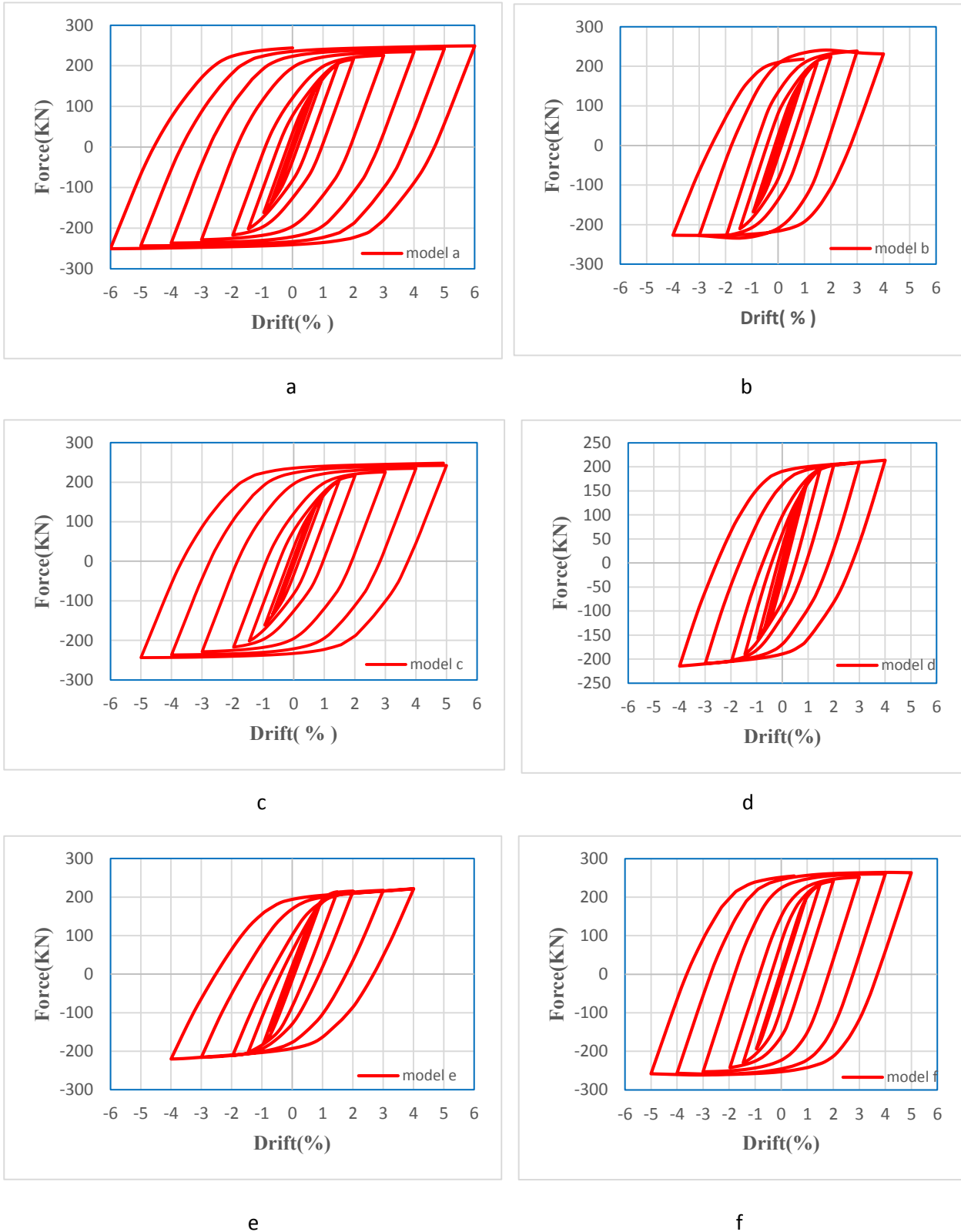
e

f

شکل ۸. محل واماندگی و تمرکز تنش در مدل‌ها:

a)model a، (b)model b، (c)model c، (d)model d، (e)model e، (f)model f

Fig. 8. Place of failure and stress concentration in models:
(a) model a, (b) model b, (c) model c, (d) model d, (e) model e, (f) model f



شکل ۹. رفتار هیستریتیک مدل‌های مورد مطالعه:
a) model a، (b) model b، (c) model c، (d) model d، (e) model e، (f) model f
Fig. 9. Hysteretic behavior of studied models:
(a) model a, (b) model b, (c) model c, (d) model d, (e) model e, (f) model f

جدول ۴. خلاصه نتایج هیسترتیک مدل‌های مورد مطالعه

Table 4. Summary of the hysteretic results of the studied models

نمونه‌ها	جابه‌جایی ماکزیمم (m)	حالت شکست	حداکثر بار طبقه (KN)	حداقل بار طبقه (KN)
مدل a	۰/۰۶	شکست فیوز	۲۴۹	۲۵۰
مدل b	۰/۰۴	شکست فیوز	۲۳۱	۲۲۶
مدل c	۰/۰۵	شکست فیوز	۲۴۲	۲۴۳
مدل d	۰/۰۴	شکست فیوز	۲۱۳	۲۱۴
مدل e	۰/۰۴	شکست فیوز	۲۲۰	۲۲۰
مدل f	۰/۰۵	شکست فیوز	۲۶۳	۲۵۸

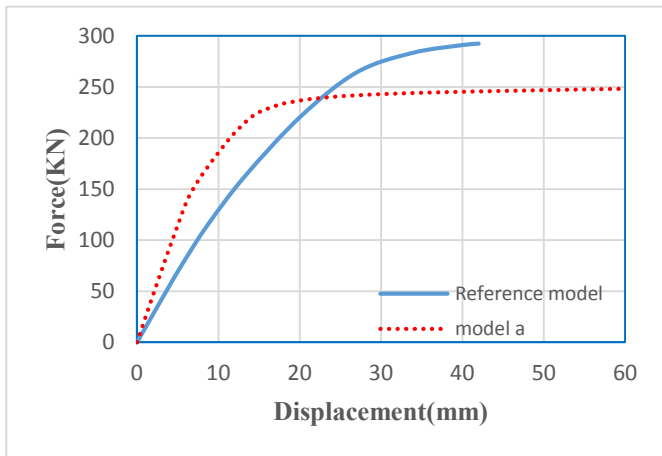
۳-۳- انرژی اتلاف

شکل ۱۲ مقایسه انرژی اتلاف همه مدل‌ها با مدل مرجع را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۲ می‌توان مشاهده کرد، مدل a و C از دسته فیوزهای که در ابتدا و انتهای مهاربند المان زانو قرار گرفته بودند انرژی اتلاف بالایی را نشان دادند که این نشان‌دهنده هندسه و محل قرارگیری مناسب فیوز است. در میان مدل‌هایی که در دسته بعدی یعنی فیوزهای قرار گرفته در ابتدا، وسط و انتها، قرار می‌گیرند مدل f انرژی اتلاف مناسبی داشت و آن را می‌توان تقریباً هم‌تراز فیوز C قرارداد. سایر مدل‌ها تقریباً جذب انرژی یکسانی داشتند. شکل ۱۳ مقایسه انرژی اتلاف همه مدل‌ها با یکدیگر را نشان می‌دهد. در شکل ۱۳ می‌توان مشاهده کرد که مدل a در دسته فیوزهای قرار گرفته در ابتدا و انتها بالاترین جذب انرژی را در میان همه مدل‌ها داشت، بعد از آن مدل f که در دسته دوم قرار دارد بالاترین جذب انرژی را نشان داد. مدل C با اختلاف کمی بعد از مدل f قرار گرفت و سپس مدل‌های b، e و d به ترتیب بالاترین جذب انرژی را داشتند؛ بنابراین توصیه می‌شود که برای قاب‌های فولادی با اتصالات المان زانو جهت استفاده از فیوزهای دسته اول یعنی فیوز قرار گرفته در ابتدا و انتها و دسته دوم؛ یعنی فیوزهای قرار گرفته در ابتدا، وسط و انتها به ترتیب از مدل‌های a و f استفاده شود.

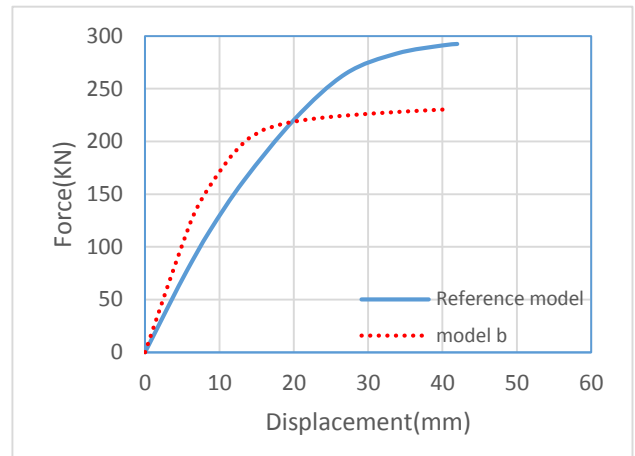
موضوع به دلیل هندسه و محل قرارگیری فیوز است. بعد از آن مدل C چرخه بارگذاری مناسبی را تحمل کرد. مدل‌های d و e از مدل‌های بودند که فیوز در ابتدا، انتها و وسط آن‌ها قرار داشت و رفتار هیسترتیک تقریباً مشابهی داشتند. مدل f با فیوزهای قرار گرفته در ابتدا، انتها و وسط نسبت نمونه‌های مشابه e و d چرخه بارگذاری بیشتر و افت مقاومت کمتری نشان داد و این موضوع نشان‌دهنده اهمیت موقعیت قرارگیری فیوز است.

جدول ۴ خلاصه نتایج هیسترتیک مدل‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد و جابه‌جایی ماکزیمم، حالت شکست و حداکثر و حداقل بار اعمال شده توسط قاب در طول آزمایش را نشان می‌دهد.

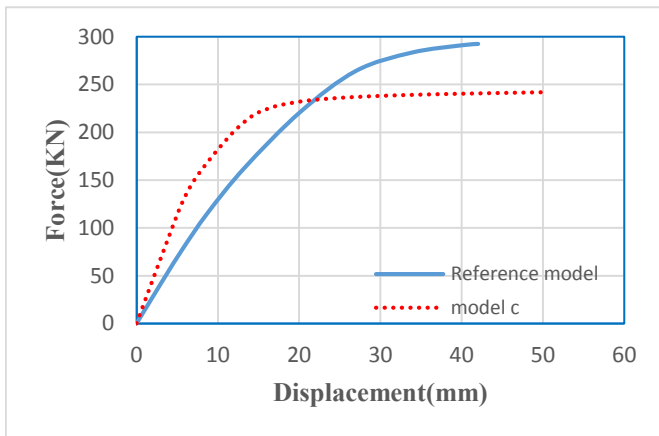
شکل ۱۰ نمودار پوش آور مدل‌های مورد مطالعه را با نمونه مرجع مقایسه می‌کند. منحنی پوش آور مطابق استاندارد ۲۸۰۰ ترسیم شده است. در رسم نمودار پوش آور بار رفته‌رفته زیاد شده تا زمانی که سازه به تغییر مکان هدف متناظر با دریفت ۲/۵ درصد محاسبه شده برسد. می‌توان مشاهده کرد که مقاومت تمام مدل‌های مورد مطالعه از نمونه مرجع کمتر است. همچنین سختی نمونه‌ها بین ۳ تا ۴ برابر افزایش یافته است. این موضوع به این دلیل است که فیوزها به گونه طراحی شده‌اند که ظرفیت کششی مهاربندهای المان زانو را به ظرفیت اتصالات کاهش دهند و همین موضوع به ناچار مقداری کاهش مقاومت را به دنبال دارد. مقایسه منحنی پوش آور همه نمونه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که می‌توان دید به ترتیب مدل‌های a، f و c بیشترین شکل‌پذیری را از خود نشان دادند.



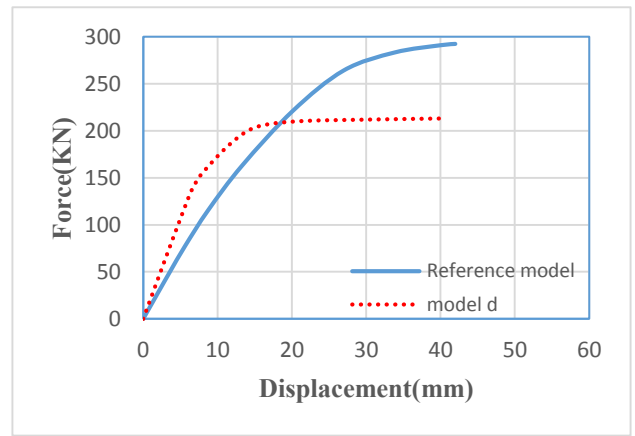
a



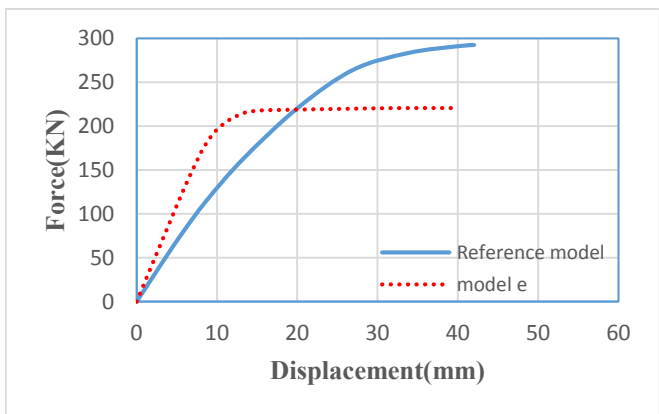
b



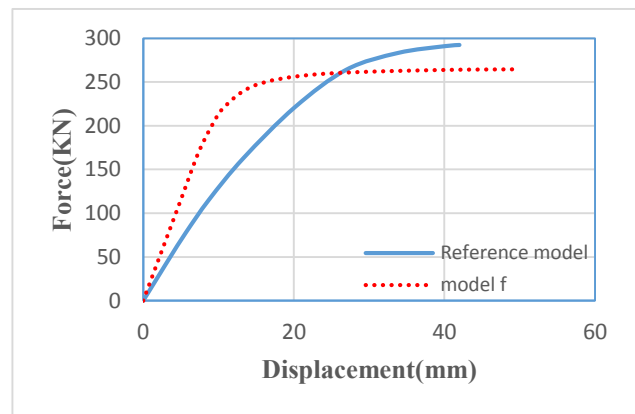
c



d



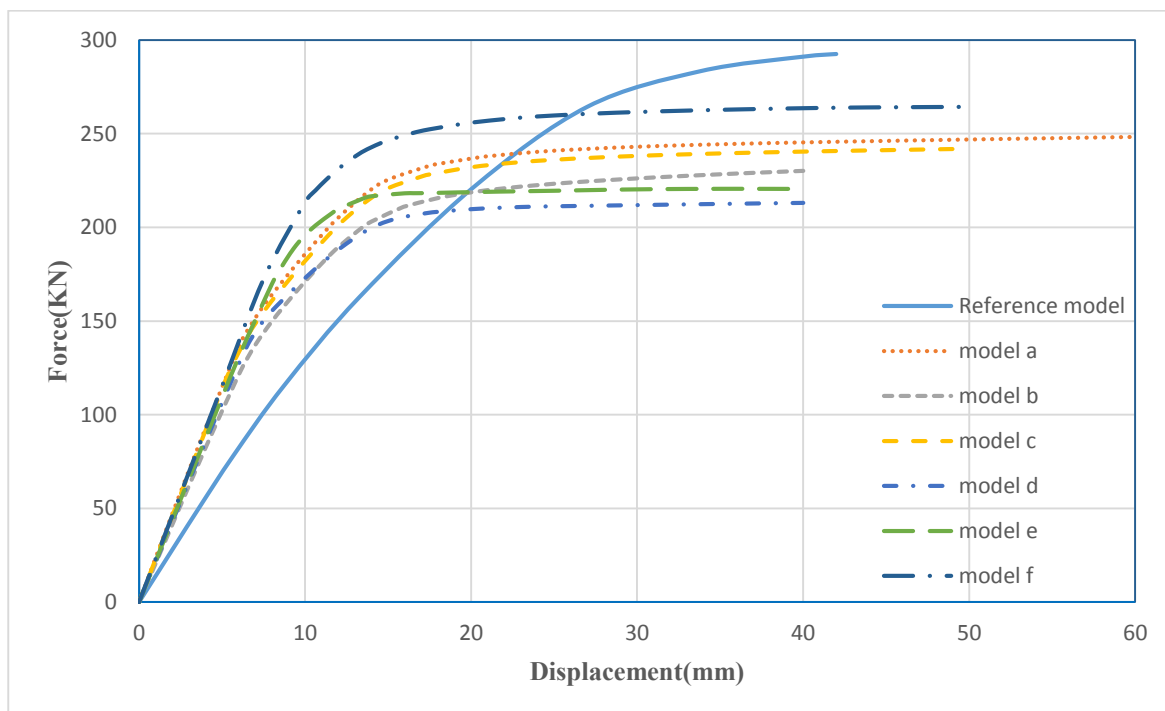
e



f

شکل ۱۰. مقایسه نمودار پوش آور مدل‌های مورد مطالعه با مدل مرجع: (a) model a، (b) model b، (c) model c، (d) model d، (e) model e، (f) model f

Fig. 10. Comparison of Pushover diagram of the studied models with the reference model: (a) model a, (b) model b, (c) model c, (d) model d, (e) model e, (f) model f



شکل ۱۱. مقایسه منحنی پوش آور همه نمونه‌ها

Fig. 11. Comparison of Pushover curve of all samples

۴- نتیجه‌گیری

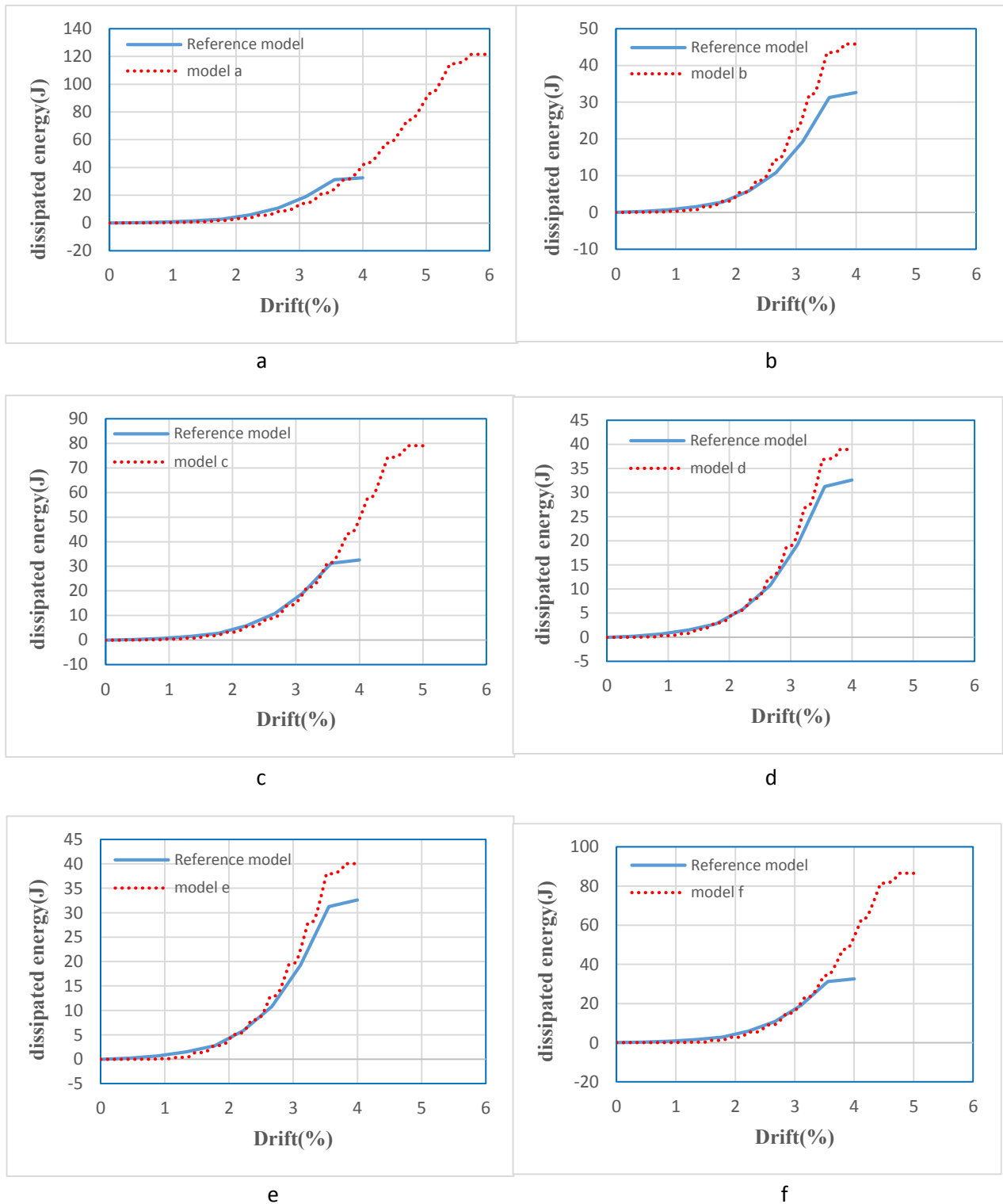
در این مقاله عملکرد مدل‌سازی فیوزهای تسلیم شونده در قسمت‌های مختلف عضو المان زانو در اتصالات المان زانو مورد ارزیابی قرار گرفت. فیوزها با ظرفیت کششی برابر با ظرفیت اتصالات طراحی شده‌اند تا از خرابی اتصال جلوگیری شود. بر اساس تحقیقات مدل‌سازی، نتایج زیر حاصل می‌شود.

۱- در پیکربندی‌های فیوز، بار در اتصال کمتر از مقاومت محاسبه شده آن بود و یک رفتار انعطاف‌پذیر ارائه داد. مدل‌سازی در مقیاس کامل انجام شد و عملکرد طراحی‌های مختلف فیوز، موقعیت فیوز، تعداد فیوز و هندسه فیوز مورد ارزیابی قرار گرفت. تمامی مدل‌های مورد مطالعه حداقل به اندازه آزمایش مرجع چرخه بارگذاری را تحمل کردند. همان‌طور که انتظار می‌رفت شکست تمامی مدل‌های مورد مطالعه به دلیل خرابی در فیوز رخ داد که این طراحی صحیح فیوز را نشان می‌دهد. مدل a با چهار فیوز قرار گرفته در ابتدا و انتهای المان مهاربند زانو چرخه بارگذاری بیشتری نسبت به مدل‌های b و c که فیوز آن‌ها به‌طور مشابه در ابتدا و انتهای المان مهاربند زانو قرار گرفته است تحمل کرد که این موضوع به دلیل هندسه و محل قرارگیری فیوز است. بعد از آن مدل c چرخه بارگذاری مناسبی را تحمل کرد. مدل‌های d و e از مدل‌های بودند که فیوز در ابتدا، انتها و وسط آن‌ها قرار داشت و رفتار هیسترتیک تقریباً مشابهی داشتند. مدل f با فیوزهای قرار گرفته در ابتدا، انتها و وسط نسبت به نمونه‌های مشابه e و d چرخه بارگذاری بیشتری را نشان داد و این موضوع نشان‌دهنده اهمیت موقعیت قرارگیری فیوز است. می‌توان مشاهده کرد که مدل a در دسته فیوزهای قرار گرفته در ابتدا و انتها بالاترین جذب انرژی را در میان همه مدل‌ها داشت، بعد از آن مدل f که در دسته دوم قرار دارد بالاترین جذب انرژی را نشان داد. مدل c با اختلاف کمی بعد از مدل f قرار گرفت و سپس مدل‌های b، e و d به ترتیب بالاترین جذب انرژی را داشتند.

۲- شیب منحنی‌های هیستریزس مدل‌های مجهز به فیوز نسبت به مدل مرجع اندکی کاهش یافته است و این موضوع نشان‌دهنده اندکی کاهش

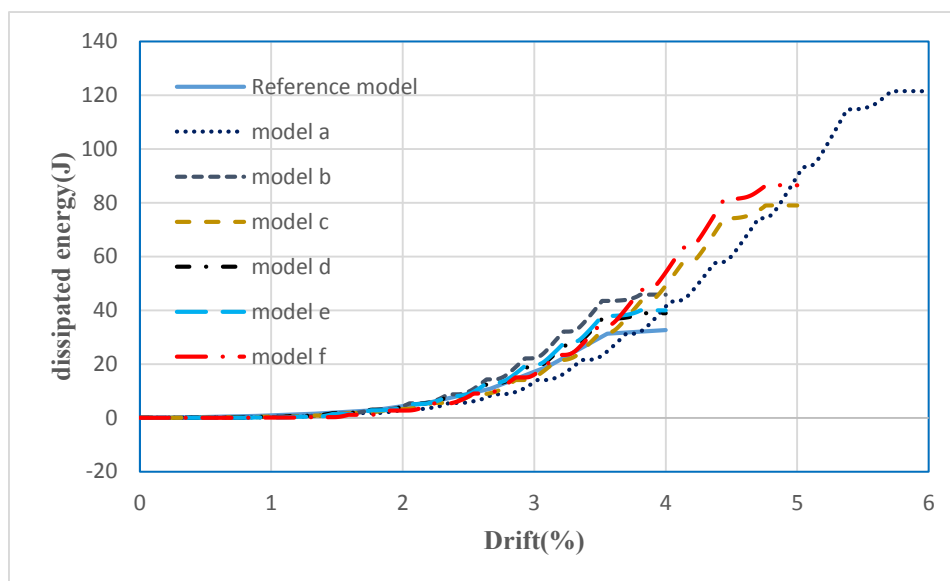
۱- در پیکربندی‌های فیوز، بار در اتصال کمتر از مقاومت محاسبه شده آن بود و یک رفتار انعطاف‌پذیر ارائه داد. مدل‌سازی در مقیاس کامل انجام شد و عملکرد طراحی‌های مختلف فیوز، موقعیت فیوز، تعداد فیوز و هندسه فیوز مورد ارزیابی قرار گرفت. تمامی مدل‌های مورد مطالعه حداقل به اندازه آزمایش مرجع چرخه بارگذاری را تحمل کردند. همان‌طور که انتظار می‌رفت شکست تمامی مدل‌های مورد مطالعه به دلیل خرابی در فیوز رخ داد که این طراحی صحیح فیوز را نشان می‌دهد. مدل a با چهار فیوز قرار گرفته در ابتدا و انتهای المان مهاربند زانو چرخه بارگذاری بیشتری نسبت به مدل‌های b و c که فیوز آن‌ها به‌طور مشابه در ابتدا و انتهای المان مهاربند زانو قرار گرفته است تحمل کرد که این موضوع به دلیل هندسه و محل قرارگیری فیوز است. بعد از آن مدل c چرخه بارگذاری مناسبی را تحمل کرد. مدل‌های d و e از مدل‌های بودند که فیوز در ابتدا، انتها و وسط آن‌ها قرار داشت و رفتار هیسترتیک تقریباً مشابهی داشتند. مدل f با فیوزهای قرار گرفته در ابتدا، انتها و وسط نسبت به نمونه‌های مشابه e و d چرخه بارگذاری بیشتری را نشان داد و این موضوع نشان‌دهنده اهمیت موقعیت قرارگیری فیوز است. می‌توان مشاهده کرد که مدل a در دسته فیوزهای قرار گرفته در ابتدا و انتها بالاترین جذب انرژی را در میان همه مدل‌ها داشت، بعد از آن مدل f که در دسته دوم قرار دارد بالاترین جذب انرژی را نشان داد. مدل c با اختلاف کمی بعد از مدل f قرار گرفت و سپس مدل‌های b، e و d به ترتیب بالاترین جذب انرژی را داشتند.

۲- شیب منحنی‌های هیستریزس مدل‌های مجهز به فیوز نسبت به مدل مرجع اندکی کاهش یافته است و این موضوع نشان‌دهنده اندکی کاهش



شکل ۱۲. مقایسه انرژی اتلاف همه مدل‌ها با مدل مرجع: (a)model a، (b)model b، (c)model c، (d)model d، (e)model e، (f)model f

Fig. 12. Comparison of the energy dissipation of all models with the reference model: (a) model a, (b) model b, (c) model c, (d) model d, (e) model e, (f) model f



شکل ۱۳. مقایسه انرژی اتلاف همه مدل‌ها با یکدیگر

Fig. 13. Comparison of energy dissipation of all models with each other

۵- فهرست علائم

b	عرض بال مقطع المان زانو، mm
H	ارتفاع جان مقطع المان زانو، mm
tf	ضخامت بال مقطع، mm
tw	ضخامت جان مقطع، mm
L	طول مقطع المان زانو

منابع

- [1] A. ANSI, AISC 341-16: Seismic provisions for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction Inc, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, (2016).
- [2] S.J.V.G.D. Committee, Recommended Specifications and Quality Assurance Guidelines for Steel Moment Frame Construction for Seismic Applications, FEMA, 2000.
- [3] M. Lotfollahi, M. Mofid, On the design of new ductile knee bracing, Journal of Constructional Steel Research,

سختی است. همچنین ارتفاع این منحنی‌ها نسبت به مدل مرجع کاهش یافته است و این موضوع بیانگر کاهش مقاومت فشاری این مدل‌ها است. قابل ذکر است که در میان این مدل‌ها، مدل f کمترین کاهش مقاومت فشاری را نشان داد و مدل‌های a و c بعد از آن قرار می‌گیرند. مدل a کمترین کاهش در سختی را نشان داد. مدل‌های f و c کاهش سختی تقریباً مشابهی داشتند و بعد از مدل a قرار می‌گیرند. مدل b از لحاظ کاهش مقاومت فشاری بعد از مدل‌های a و c و از لحاظ کاهش سختی بعد از مدل‌های f و c قرار می‌گیرد. بعد از ترتیب ذکر شده، مدل‌های d و e که افت مقاومت فشاری و سختی تقریباً مشابهی داشتند قرار می‌گیرند. اگرچه مهاربندهای مجهز به فیوز مقدار مشخصی از مقاومت را در مقایسه با آزمایش مرجع از دست دادند؛ اما الزامات طراحی کشش/ فشار را برآورده کردند.

۳- از لحاظ شکل‌پذیری مهاربند مجهز به دو فیوز که در هر دو انتهای المان زانو قرار گرفته (مدل a) بالاترین شکل‌پذیری را نشان داد. مدل‌های f و c بعد از مدل a قرار می‌گیرند. همچنین مدل‌های b، d، e شکل‌پذیری مشابهی داشتند.

۴- به عنوان یک جمع‌بندی می‌توان گفت الگوی فیوز مورد استفاده برای مدل‌سازی‌های a، f و c برخلاف مدل‌های b، d و e به ویژه مدل b که عمدتاً به دلیل هندسه نامناسب فیوز، عملکرد ضعیفی داشتند، کارآمدترین بودند.

- knee bracing, *Computers & Structures*, 75(1) (2000) 65-72.
- [16] Z. Huang, L. Qing-song, C. Long-zhu, Elastoplastic analysis of knee bracing frame, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 6 (2005) 784-789.
- [17] S. Leelataviwat, B. Suksan, J. Srechai, P. Warnitchai, Seismic design and behavior of ductile knee-braced moment frames, *Journal of structural engineering*, 137(5) (2011) 579-588.
- [18] N. Wongpakdee, S. Leelataviwat, S.C. Goel, W.-C. Liao, Performance-based design and collapse evaluation of buckling restrained knee braced truss moment frames, *Engineering Structures*, 60 (2014) 23-31.
- [19] J. Shin, K. Lee, S.-H. Jeong, J. Lee, Probabilistic performance assessment of gravity-designed steel frame buildings using buckling-restrained knee braces, *Journal of Constructional Steel Research*, 104 (2015) 250-260.
- [20] H.-L. Hsu, Z.-C. Li, Seismic performance of steel frames with controlled buckling mechanisms in knee braces, *Journal of Constructional Steel Research*, 107 (2015) 50-60.
- [21] A. Asghari, A.H. Gandomi, Ductility reduction factor and collapse mechanism evaluation of a new steel knee braced frame, *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(2) (2016) 239-255.
- [22] A. Asghari, S. Saharkhizan, Seismic design and performance evaluation of steel frames with knee-element connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 154 (2019) 161-176.
- [23] C. Csa, CSA-S16-09: design of steel structures, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario, Canada, (2009).
- [24] A. ANSI, AISC 341-16: Seismic provisions for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction Inc, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, (2016).
- [25] C. Duncan, The 2005 AISC Specification for Structural Steel Buildings : An Introduction, 2005.
- [26] N.M. Newmark, W.J. Hall, Earthquake spectra and design, *Engineering monographs on earthquake criteria*, 62(3) (2006) 282-294.
- [4] R. Sabelli, Research on improving the design and analysis of earthquake-resistant steel-braced frames, EERI Oakland, CA, USA, 2001.
- [5] M.D. Engelhardt, E.P. Popov, On design of eccentrically braced frames, *Earthquake spectra*, 5(3) (1989) 495-511.
- [6] M. TahamouliRoudsari, M. Torkaman, F. Soroush, Experimental and numerical investigation of axial load effects on the seismic behavior of steel moment-resisting frames and buckling-restrained knee-braced frames, *Asian Journal of Civil Engineering*, 21(3) (2020) 449-461.
- [7] J.D. Aristizabal-Ochoa, Disposable knee bracing: improvement in seismic design of steel frames, *Journal of Structural engineering*, 112(7) (1986) 1544-1552.
- [8] T. Balendra, M.T. Sam, C.Y. Liaw, Diagonal brace with ductile knee anchor for aseismic steel frame, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 19(6) (1990) 847-858.
- [9] T. Balendra, M. Sam, C. Liaw, Design of earthquake-resistant steel frames with knee bracing, *Journal of Constructional Steel Research*, 18(3)(1991)193-208.
- [10] T. Balendra, M.-T. Sam, C.-Y. Liaw, S.-L. Lee, Preliminary studies into the behaviour of knee braced frames subject to seismic loading, *Eng. Struct.* 13(1991)67-74.
- [11] T. Balendra, M.-T. Sam, C.-Y. Liaw, S.-L. Lee, Preliminary studies into the behaviour of knee braced frames subject to seismic loading, *Engineering structures*, 13(1)(1991)67-74.
- [12] M.-T. Sam, T. Balendra, C.-Y. Liaw, Earthquake-resistant steel frames with energy dissipating knee elements, *Engineering Structures*, 17(5)(1995)334-343.
- [13] T. Balendra, E. Lim, C. Liaw, Large-scale seismic testing of knee-brace-frame, *Journal of structural engineering*, 123(1) (1997)11-19.
- [14] T. Balendra, C.H. Yu, F.L. Lee, An economical structural system for wind and earthquake loads, *Engineering Structures*, 23(5) (2001) 491-501.
- [15] M. Mofid, P. Khosravi, Non-linear analysis of disposable

- conference on Earthquake Engineering (Sep. 2012), Lisbon, Portugal, 2012.
- [29] H. Krawinkler, Loading histories for cyclic tests in support of performance assessment of structural components, in: The 3rd international conference on advances in experimental structural engineering, San Francisco, 2009.
- (1982).
- [27] D. Kassis, Ajout de fusibles aux diagonales de contreventements pour la conception sismique de charpentes métalliques à un étage, École Polytechnique de Montréal, 2008.
- [28] E. Desjardins, F. Legeron, E. Ahmed, Performances of ductile fuses in reducing seismic demand on connections of concentrically steel braced frames, in: 15th World

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. H. Tanha, H. R. Ashrafi, Fuse performance in steel frames with knee element connections under cyclic loading, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(7) (2023) 1399-1418.

DOI: 10.22060/ceej.2023.22173.7920



