

The influence of the radius of curvature of the knee member on the behavior of knee braced frames

Mohammad Hossein Adibrad^{1✉} , Mina Mortezaie² 

1. Corresponding Author, Department, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: m.adibrad@razi.ac.ir

2. Department, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: mortezaie.m87@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received

2024-03-10

Revised

2024-05-07

Accepted

2024-06-18

Available online

2024-06-29

Keywords:

Knee braced frame,
Finite element method,
Seismic performance

ABSTRACT

Reducing the irreversible damage caused by earthquakes has always been the ultimate goal for researchers and scientists in earthquake engineering. Knee-braced frames (KBFs) are one of the common lateral load-resisting systems against seismic forces. During a severe earthquake, all frame components remain within the elastic range, while only the knee member enters the plastic range. In previous studies, the knee member was considered a linear element (with an infinite radius of curvature) that acted as a beam when absorbing energy. In the present research, using the ABAQUS finite element software, the radius of curvature of the knee member was reduced, transforming it from a linear element into an arc element. The simultaneous impact of axial force, shear force, and bending moment on energy absorption was examined. The results indicate that in frames with a constant span-to-height ratio, the arched knee member demonstrates better seismic performance compared to the linear knee member, increasing the frame's load-bearing capacity by up to 15%. However, with an increase in the span-to-height ratio, alongside a roughly 40% increase in strength, the likelihood of failure more than doubles.

Cite this article: Adibrad, Mohammad Hossein, & Mortezaie, Mina. (2024). The influence of the radius of curvature of the knee member on the behavior of knee braced frames. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 1(1), 147-160.

DOI: 10.22126/amcen.2024.3285



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2024.3285

Publisher: Razi University.

Introduction

In knee-braced frames (KBFs), the frame stiffness is provided by diagonal braces that are connected to the knee member instead of the beam-column joint. The brace limits inter story drift, while the knee member dissipates seismic input energy through cyclic deformation in shear or bending. In this respect, KBFs combine the lateral stiffness similar to concentrically braced frames (CBF) with the ductile behavior of moment-resisting frames, akin to what is observed in eccentrically braced frames (EBF). The main advantage of knee-braced frames over eccentrically braced frames is that damage is concentrated in a single secondary member, which can be easily replaced after a destructive earthquake. The main idea for this type of bracing was introduced in 1986 by a design engineer named Aristizábal-Ochoa (1986). Mofid et.al. presented the linear behavior of the proposed system and the appropriate shape and degree for the bracing member. In all the previous studies, the knee member acted as a beam, but in this research, by changing the radius of curvature of the knee member, this member is affected by the axial force in addition to the shear force and bending moment, and in fact, the energy consumption will be achieved by using the arc function. And the influence of the radius of curvature on the seismic behavior of frames with different height-to-span ratio is investigated.

Method

For validation and verification in this research, the laboratory studies of the frame with a knee brace, which was carried out by Zahraei et al. in 2014, were used. In their experiments, Zahraei et al. designed samples according to AISC (2005) seismic regulations, similar to frames with divergent bracing. The frames were installed by means of screws at the base of each column to a strong beam connected to the floor of the structural laboratory of the building and housing research center. The plasticity characteristics of the non-linear behavior of steel were considered in the form of a bilinear diagram with isotropic strain hardening. The results of their test showed that the overall frameset showed very good behavior with regard to the overall shape of the cycles and before the frame failure. For parametric studies in this research, 12 models were made using ABAQUS finite element software with steel materials.

Results

According to the results, in all cases, with the increase in the ratio of span-to-height, due to the increase in the area under the curve, the seismic energy loss has increased and the seismic capacity of the frames has been increased. The increase in the seismic capacity of frames with a ratio of span-to-height of 2 is higher than that of frames with a ratio of span-to-height of 1.5 and 1 in all models, and also due to the increase in the slope of the graph in these models, the stiffness of the frames increases. In the frames that have a constant ratio span-to-height, frames with a radius of 1 (arc-shaped knee member) show the best performance in terms of stiffness and increased seismic capacity. The results of the analysis indicate that in all samples, with changes in the radius of

curvature from one meter to infinity, the amount of equivalent plastic strain increases, and as a result, the frames show more potential for cracking.

Conclusions

In a fixed radius of curvature in all models, the use of rectangular frames shows better seismic performance than square frames, but the amount of equivalent plastic strain shows more, as a result of these frames. They have more potential for failure. The knee member with a curvature radius of one meter (arc) compared to the knee member with an infinite curvature radius (straight line) has shown better seismic performance, and this improvement is due to the increase in the ratio of span-to-height (i.e. changing the frame from square to rectangular) increases. In frames with a constant ratio of span-to-height, the frames with an arc knee show a lower equivalent plastic strain than the frames with a straight knee.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



تأثیر شعاع انحنای عضو زانویی بر روی رفتار قاب‌های مهاربندی شده زانویی

محمد حسین ادیب راد^۱، مینا مرتضایی^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: m.adibrad@razi.ac.ir

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: m.mortezaie87@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۱۲/۲۰

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۳/۲۹

تاریخ انتشار:

۱۴۰۳/۰۴/۰۹

کلیدواژه‌ها:

قاب مهاربندی شده زانویی،

اجزا محدود،

عملکرد لرزه‌ای

کاهش خسارات جبران ناپذیر زلزله همیشه هدف نهایی محققان و دانشمندان در مهندسی زلزله بوده است. قاب‌های مهاربندی شده زانویی (KBF) یکی از سیستم‌های باربر جانبی معمول در مقابل نیروی زلزله هستند که در هنگام وقوع زلزله شدید کلیه اجزای قاب در محدوده الاستیک باقی مانده و تنها عضو زانویی وارد حیطه پلاستیک می‌گردد. در مطالعات گذشته عضو زانویی به صورت یک المان خطی (شعاع انحنای بی نهایت) در نظر گرفته می‌شد که در هنگام جذب انرژی به صورت یک تیر عمل می‌کرد. در تحقیق پیش رو، با کمک نرم افزار المان محدود ABAQUS، ضمن کاهش شعاع انحنای عضو زانویی و تبدیل آن از المانی خطی به یک المان قوسی، تأثیر هم زمان نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی در جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در قاب‌های با نسبت طول دهانه به ارتفاع ثابت، عضو زانویی قوسی نسبت به عضو زانویی خطی عملکرد لرزه‌ای بهتری را نشان داده و میزان باربری قاب را تا ۱۵ درصد افزایش می‌دهد اما با افزایش نسبت دهانه به ارتفاع در کنار افزایش حدود ۴۰ درصد مقاومت بیش از دو برابر احتمال گسیختگی افزایش می‌یابد.

استناد: ادیب راد، محمد حسین؛ مرتضایی، مینا. (۱۴۰۳). تأثیر شعاع انحنای عضو زانویی بر روی رفتار قاب‌های مهاربندی شده زانویی. مجله مدل‌سازی

پیشرفته در مهندسی عمران، ۱ (۱)، ۱۶۰-۱۴۷. DOI: 10.22126/amcen.2024.3285



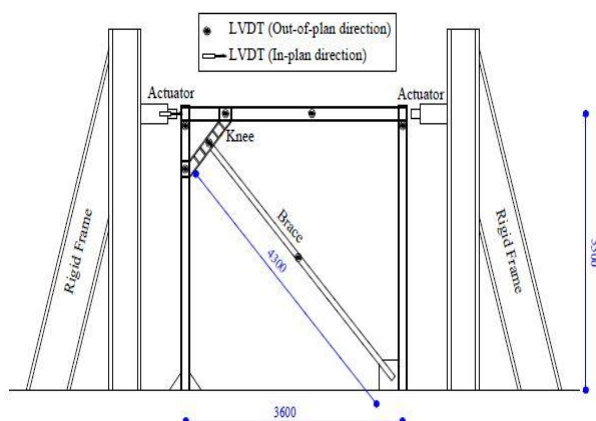
© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

در قاب‌های مهاربندی شده زانویی (KBF) سختی قاب به وسیله مهاربندهای قطری که به جای متصل شدن به گره اتصال تیر به ستون، به عضو زانویی متصل می‌شوند تامین می‌گردد. مهاربند رانش بین طبقه را محدود می‌کند، در حالی که عضو زانویی انرژی ورودی زلزله را با استفاده از تغییرشکل‌های چرخه-ای در برش و یا خمش مستهلک می‌نماید. از این نظر، KBF ها سختی جانبی شبیه به قاب‌های مهاربندی شده هم مرکز (CBF) را با رفتار انعطاف پذیر قاب‌های خمشی، مشابه آنچه که در قاب-های مهاربندی شده برون محور (EBF) می‌بینیم ترکیب می‌کنند. مزیت اصلی قاب‌های مهاربندی شده زانویی نسبت به قاب-های مهاربندی شده برون محور آن است که آسیب تنها در یک عضو ثانویه متمرکز می‌شود که به راحتی می‌تواند پس از زمین لرزه مخرب جایگزین گردد [۱]. ایده اصلی این مهاربند در سال ۱۹۸۶ توسط یک مهندس طراح به نام آریستیزابل آچوا مطرح شد. در ایده اولیه فرض بر این بود که مهاربند فشاری کمانش کند و مهاربند کششی بدون اینکه دچار تسلیم شود، وظیفه تأمین شکل پذیری و اتلاف انرژی را از طریق تسلیم عضو زانویی به عهده داشته باشد [۲]. پس از آچوا محقق دیگری به نام بالندرا پیشنهاد داد تا به منظور بهبود رفتار این سیستم فقط از یک مهاربند قطری استفاده گردد و آن مهاربند قطری به گونه‌ای طرح شود که در اثر فشار وارده کمانش نکند. بالندرا و همکارانش اثر پارامترهای مختلف بر روی سختی و شکل پذیری قاب را مورد بررسی قرار دادند و روشی برای طراحی سیستم (با شرط الاستیک ماندن اعضای اصلی سازه‌ای، همانند قاب، تیر، ستون و مهاربند) ارائه نمودند. مفید و همکاران رفتار خطی سیستم پیشنهادی، شکل و درجه مناسب برای عضو مهاربندی را ارائه نمودند. سپس با طراحی بر اساس گراف‌ها و نمودارهای اصلی رفتار دینامیکی این مدل را توضیح دادند. این روش بر مبنای صدها تحلیل انجام شد و نتایج نمودارها نشان داد که مسائل دینامیکی واقعی می‌تواند به تکنیک طراحی ساده با استفاده از نمودارها و مدل‌های رفتاری دوخطی ساختمانی تبدیل شود [۳]. رفتار غیر خطی قاب بر اساس سیستم مهاربند زانویی تحت تاثیر زلزله در مقاله‌ای توسط دانشجو و همکاران تحلیل شد. در این مقاله، اثر پارامترهای هندسی و مشخصات اعضا بر سختی جانبی قاب‌های KBF بررسی شد و محدوده مناسب برای پارامترهای

هندسی که در تامین سختی لازم سیستم موثرند تعیین گردید. سپس رفتار لرزه‌ای یک نوع از قاب‌های با مهاربند زانویی و نقش پارامترهای موثر بر رفتار دینامیکی غیرخطی آن تحت تاثیر زلزله‌های ناغان و السنترو بررسی و ارزیابی شد و با رفتار لرزه‌ای سیستم‌های هم محور (CBF) و برون محور (EBF) مشابه مقایسه گردید [۴]. هوانگ ژن و همکاران رابطه بین نقش لرزه‌ای مهاربند و پارامترهای سازه را با تجزیه و تحلیل غیرخطی سازه مهاربندی زانویی با استفاده از روش اجزای محدود مشخص نمودند و پیشنهاداتی برای طراحی کلی مهاربند زانویی با توجه به نتیجه تجزیه و تحلیل ارائه دادند [۵]. جلالی و زهرایی نقش مهاربند زانویی به عنوان میراگر هیستریزیس را بررسی کردند. کلیه مراحل مطالعه آن‌ها بر روی قاب‌های یک طبقه و با تحلیل منحنی‌های هیستریزیس با استفاده از بارهای چرخه‌ای انجام شد که در آن عملکرد قاب مهاربند زانویی دو طرفه نیز بررسی گردید. نتایج تحلیل‌ها نشان داد، در صورتی که طول زانویی کوتاهتر انتخاب شود، می‌توان از اثرات منفی وجود اتصال مفصلی بین تیر و ستون کاست. این مسئله نشان می‌دهد که با انتخاب سنجیده طول عضو زانویی، می‌توان تا حدی، نیاز به اتصالات خمشی تیر به ستون را حداقل برای ساختمان‌های متعارف و کوتاه مرتبه کاهش داد. این نکته می‌تواند به عنوان یک مزیت برای قاب‌های مهاربندی شده با مهاربند زانویی محسوب شود [۶]. نعیمی و بزرگی با انجام تحلیل خطی و غیرخطی در انواع مختلفی از قاب-های مهاربندی شده زانویی رفتار لرزه‌ای این سیستم را برای کنترل آسیب پذیری در سازه تجزیه و تحلیل کردند [۷]. جلالی و همکاران با استفاده از روش تحلیل غیرخطی اثر پارامترهای سازه‌ای مختلف را بررسی کردند. به علاوه، مدل‌های ریاضی را برای تخمین سختی غیرالاستیک قاب ارائه دادند. نتیجه این مطالعه نشان داد، در حالی که میرایی سازه‌های بتنی و فلزی کمتر از ۵ درصد است، حداکثر نسبت میرایی ویسکوز معادل قاب مهاربندی شده زانویی به حدود ۳۰ درصد می‌رسد [۸]. نوری و همکاران بررسی امکان استفاده از مهاربندهای زانویی در تقویت سازه‌های فولادی موجود با سیستم قاب خمشی ویژه را مورد مطالعه قرار دادند [۹]. حجازی و همکاران اثر طول و موقعیت عناصر زانویی بر رفتار سازه‌های قاب‌های فولادی مهاربندی شده با مهاربند زانویی در مقایسه با قاب‌های مهاربندی شده متقاطع را مورد تحلیل قرار دادند. در این مطالعه نشان داده شد که طراحی بهینه قاب‌های فولادی که در برابر بارهای جانبی مقاوم هستند



شکل ۱. نمونه قاب آزمایش شده توسط زهرایی و همکاران [۱۳]

پس از ساخت مدل اجزای محدود نمونه آزمایش شده، رفتار هیستریزیس مدل تحلیلی با مدل آزمایشگاهی مقایسه گردید همانطوری که در شکل ۲ ملاحظه میگردد رفتار هیستریزیس مدل تحلیلی با مدل آزمایشگاهی مرجع مطابقت نسبتاً خوبی را نشان میدهد.

تکیه‌گاه‌های پیچی در اتصال هر دو ستون به کف آزمایشگاه سازه باعث یک لغزش کوچک در طول آزمایش شده که این لغزش منجر به پینچینگ در رفتار هیستریزیس کلی در نمونه‌های آزمایشی شده است. در نتیجه این باریک شدگی در نمودار چرخه‌ای نمونه آزمایشگاهی به رفتار لرزه‌ای مدل ارائه شده مربوط نبوده و تنها به دلیل لقی سیستم در پای ستون‌ها می‌باشد. همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود، این دو منحنی با یک تفاوت کوچک به یکدیگر نزدیک هستند که در واقع این موضوع صحت مدلسازی اجزای محدود نمونه را نشان می‌دهد.

باعث می‌شود که سختی و انعطاف پذیری سازه از نظر اقتصادی بهبود یابد [۱۰]. آنیتا و همکاران مقایسه‌ای بین قاب مهاربندی فولادی زانویی با مهاربند واگرا انجام دادند. در این تحقیق قاب مهاربندی زانویی دبل با قاب مهاربندی واگرا به دو روش تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مقایسه شدند [۱۱]. شیدایی و همکاران رفتار لرزه‌ای غیرخطی سیستم‌های قاب مهاربندی شده با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی را بررسی کردند و اثرات تعداد طبقات در ساختمان، طول و ممان اینرسی عضو زانویی بر رفتار لرزه‌ای، سختی الاستیک و شکل پذیری این سیستم‌ها را مشخص نمودند [۱۲].

در تمام کارهای گذشته عضو زانویی به صورت تیر عمل کرده اما در این تحقیق با تغییر شعاع انحنای عضو زانویی، این عضو علاوه بر نیروی برشی و لنگر خمشی تحت تاثیر نیروی محوری قرار گرفته و در واقع استهلاک انرژی با استفاده از عملکرد قوسی حاصل خواهد شد و تاثیر شعاع انحنای بر روی رفتار لرزه‌ای قاب‌هایی با نسبت ارتفاع به دهانه مختلف بررسی میگردد.

۲. ساخت مدل اجزای محدود

برای صحت سنجی و راستی آزمایی در تحقیق پیش‌رو، از مطالعات آزمایشگاهی قاب با مهاربند زانویی که توسط زهرایی و همکاران در سال ۲۰۱۴ انجام گرفت، استفاده شد. در شکل ۱ نمونه آزمایشگاهی و شرایط مرزی آن و در جدول ۱ جزئیات هندسی مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است [۱۳].

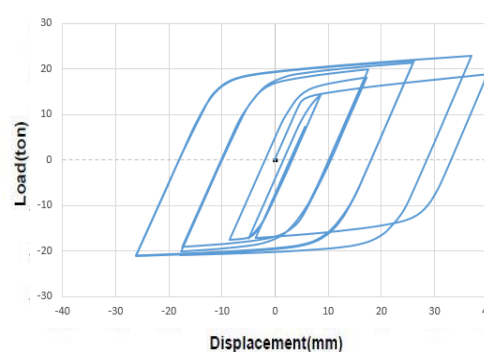
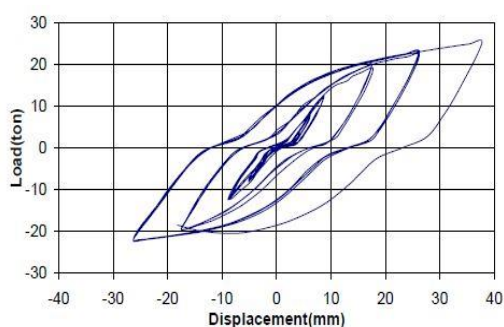
زهرایی و همکاران در آزمایش‌های خود نمونه‌ها را با توجه به مقررات لرزه‌ای (AISC (2005)، مشابه با قاب‌های با مهاربندی واگرا طراحی کردند. قاب‌ها به وسیله‌ی پیچ‌هایی در پایه هر ستون به تیر قوی متصل به کف آزمایشگاه سازه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نصب شده بودند. ویژگی‌های الاستیک مواد در جدول ۲ نشان داده شده است. ویژگی‌های پلاستیسیته رفتار غیرخطی فولاد به صورت نمودار دوخطی با سخت شدگی کرنشی ایزوتروپیک در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل از آزمایش آن‌ها نشان داد که مجموعه‌ی کلی قاب رفتار بسیار خوبی را با توجه به شکل کلی چرخه‌ها و قبل از شکست قاب نشان داده است. حداکثر برش پایه و جابجایی به ترتیب ۲۵۱ کیلو نیوتن و ۳۷/۷ میلی متر گزارش گردید. بنابراین، شکل پذیری حدود ۵/۴ به دست آمد.

جدول ۱. جزئیات هندسی مدل آزمایشگاهی [۱۳]

شماره مدل	نام مدل	تیر		ستون		زانویی		مهاربند	
		طول (mm)	مقطع	طول (mm)	مقطع	طول (mm)	مقطع	طول (mm)	مقطع
۱	KBF1	۳۶۰۰	IPE180	۳۵۰۰	2IPE140	۸۰۰	IPE120	۴۳۰۰	2UNP100

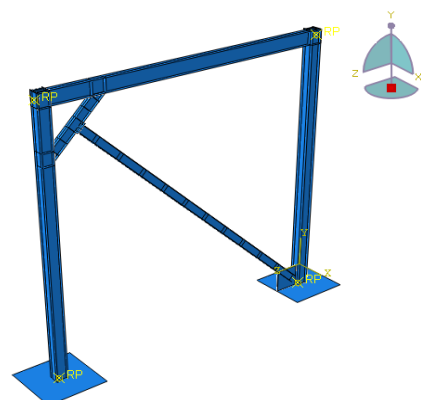
جدول ۲. مشخصات مکانیکی مصالح

ضریب پواسون	مدول یانگ (نیوتن بر میلیمتر مربع)	تنش نهایی (نیوتن بر میلیمتر مربع)	تنش تسلیم (نیوتن بر میلیمتر مربع)	مشخصات ماده
۰.۳	۲۱۰۰۰۰	۴۶۸.۰	۳۲۲.۹	فولاد



شکل ۲. رفتار هیستریزیس نمونه آزمایشگاهی (سمت چپ) و مدل تحلیلی (سمت راست)

انتهای قاب در محل اعمال بار متمرکز برای جلوگیری از تمرکز تنش و لهیدگی عضو در نواحی اعمال بار و همچنین در تکیه گاه ها، ابتدا یک صفحه صلب در این قسمت ها قرار داده شده و سپس نقطه مرجع این صفحه تحت بار یا به عنوان تکیه گاه تعریف شده است. در شکل ۳ یکی از نمونه ها نشان داده شده است.



شکل ۳. نمونه قاب مدل سازی شده در نرم افزار آباکوس

۱-۲. مطالعات پارامتریک

در این تحقیق دوازده مدل، با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS با مصالح فولادی ساخته شدند. در این دوازده مدل عضو زانویی دارای چهار شعاع انحنای مختلف (۱ و ۱۰ و ۱۰۰ و بینهایت) بر حسب متر و نسبت دهانه به ارتفاع نیز دارای سه مقدار (۱، ۱.۵ و ۲) میباشند. برای نام گذاری مدلها بعد از عبارت KBF ابتدا نسبت دهانه به ارتفاع و سپس شعاع عضو زانویی آورده شده است. به طور مثال منظور از KBF1,100 قاب با مهاربند زانویی با نسبت ارتفاع به دهانه برابر ۱ و زانویی با شعاع انحنای ۱۰۰ مترمیباشد. تمامی اعضای این مدلها با استفاده از المان shell مدل شده اند. به این منظور از المانهای چهار گرهی shell که در نرم افزار با نماد S4 نمایش داده می شود، استفاده گردید. هر گره المان shell دارای سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی می باشد [۱۴]. برای اتصال دو قطعه به یکدیگر جوش ها مدل نشده و برای اتصال قطعات از قید Tie استفاده گردیده است. در دو

شروع فرآیند گسیختگی شکل‌پذیر به دلیل مقادیر بالای تنش‌های کششی سه محوره است که در نهایت باعث شروع شکست می‌گردد. نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش فون میسر در معادله فوق الذکر، نسبت تنش سه محوری نامیده می‌شود. مقادیر بزرگ این شاخص باعث کاهش شدید کرنش گسیختگی در مواد می‌شود این افت شدید به دلیل محدود شدن شکل‌پذیری ماده اتفاق می‌افتد. در نتیجه در نواحی با مقادیر بالای شاخص گسیختگی (RI بزرگتر)، پتانسیل محتمل تری برای ترک خوردگی وجود دارد.

نسبت کرنش پلاستیک موثر به کرنش تسلیم در رابطه ی بالا کرنش پلاستیک معادل می باشد که از رابطه ۲ بدست می‌آید.

$$PEEQ\ index = \frac{\sqrt{\frac{2\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}}{3}}}{\varepsilon_y} \quad (2)$$

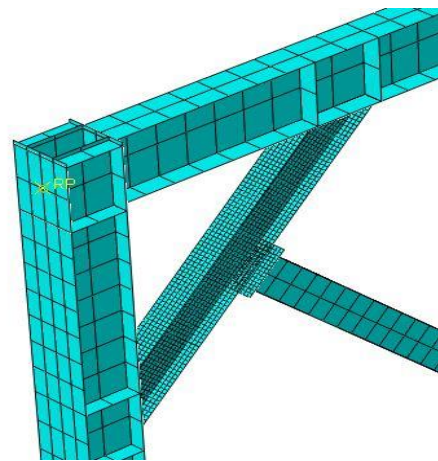
که در آن ε_{ij} مولفه های کرنش پلاستیک می‌باشد. شکل ۵ مدل‌های المان محدود (FEM) چهار نمونه KBF1 ذکر شده در بخش قبلی و نقاط بحرانی متناظر آن را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل‌ها دیده می‌شود با تغییر شعاع انحناي عضو زانویی نواحی پلاستیک شده در عضو زانویی تغییر می‌یابد.

۳-۲. راستی آزمایشی تحلیلی

در تحقیق حاضر علاوه بر تطابق نسبتاً خوب پاسخ‌های چرخه-ای تحلیلی و نمونه آزمایش مرجع نشان داده شده در شکل ۲ که نشان دهنده صحت روش مدلسازی اجزای محدود می‌باشد پارامتر دیگری که مطابقت خوبی با نتایج آزمایش دارد، کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) می‌باشد.

نتایج کرنش پلاستیک معادل با استفاده از نمودار توزیع کرنش نشان داده شده در شکل ۶ برای مدل تحلیلی نمونه آزمایش KBF1,∞ نشان داده شده است که مطابقت خوبی با نواحی پلاستیک شدگی آزمایش نشان داده شده در این شکل دارد [۱۳].

به منظور بررسی نتایج مدل و مقایسه آن با نتایج آزمایش، از تاریخچه بارگذاری استفاده شده به صورت جابجایی مطابق با بار اعمال شده در آزمایش مرجع [۱۳] استفاده گردید. مش بندی مناسب نقش مهمی در تجزیه تحلیل نرم افزار اجزای محدود برعهده دارد. در اینجا چون انتظار می‌رود تنها عضو زانویی وارد ناحیه غیرخطی شود و اعضا دیگر مانند تیر، ستون‌ها و مهاربند الاستیک باقی بمانند، بنابراین اندازه مش عضو زانویی مطابق شکل ۴ نسبت به اعضای دیگر ریزتر انتخاب شده است. در شکل ۳ نمونه قاب مدل‌سازی شده در نرم افزار و در شکل ۴ نحوه مش بندی این قاب نشان داده شده است.



شکل ۴. مش بندی قاب مدل‌سازی شده در آباکوس

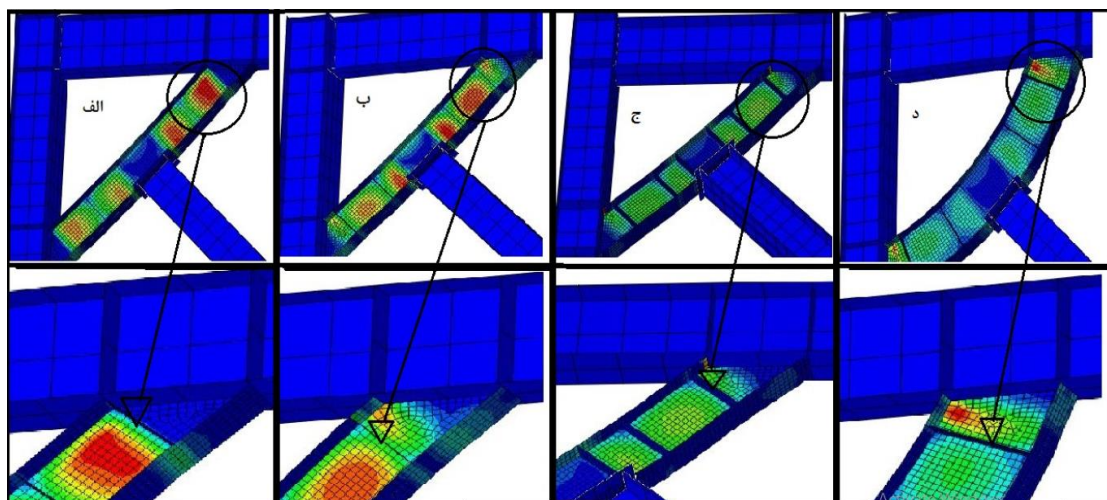
۲-۲. معرفی معیار شکست مصالح

در تحلیل‌هایی که نتوان ترک و رشد آن در مدل‌ها را مدل سازی کرد از شاخص گسیختگی (Rupture Index) برای مطالعه نواحی که پتانسیل شکست را دارا هستند استفاده میشود [۱۵]. این شاخص در نقاطی که دارای توانایی بالقوه گسیختگی هستند توسط رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$RI = \frac{\varepsilon_p / \varepsilon_y}{\exp(-1.5 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eff}})} \quad (1)$$

که ε_p ، ε_y ، σ_m و σ_{eff} به ترتیب کرنش پلاستیک موثر، کرنش تسلیم، تنش هیدرواستاتیک و تنش موثر که تنش فون میسر نیز نامیده می‌شود می‌باشند.

شاخص گسیختگی برای اولین بار توسط هانکوک و مکنزی در سال ۱۹۷۶ برای کرنش گسیختگی پلاستیک موثر در شرایط تنش سه محوره مختلف اندازه‌گیری شد [۱۶].

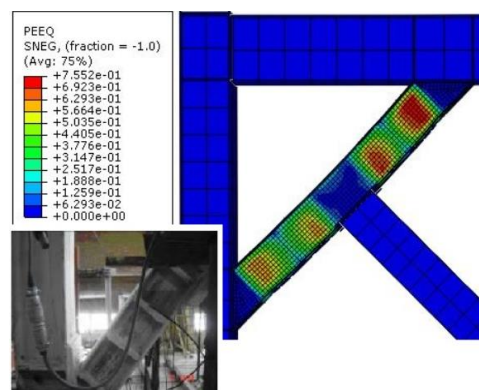


شکل ۵. (الف) مدل تحلیلی $KBF1, \infty$ ، (ب) مدل $KBF1, 100$ ، (ج) مدل $KBF1, 10$ ، (د) مدل $KBF1, 1$ و نقاط بحرانی متناظر آن‌ها

شعاع انحنای مختلف می‌باشد و همچنین مقایسه این قاب‌ها با قاب‌های مهاربندی زانویی با اندازه ارتفاع به دهانه برابر با استفاده از نرم افزار آباکوس، پرداخته است.

به این منظور، در این مطالعه روش تحلیل اجزا محدود که قبلاً توصیف شده، برای بررسی تاثیر دامنه بسیار بزرگ‌تری از متغیرهای هندسی نسبت به مدل‌های تحلیلی اولیه در حیطه مشخصات هندسی کار آزمایشگاهی [۱۳] به کار گرفته شد. مقدار اولیه شعاع انحنا در تحلیل برابر شعاع انحنای نمونه آزمایش تعریف شده است. در رابطه با این آزمایش سه گروه قاب برای مدل تحلیلی تعریف شده است. قاب‌های گروه اول $KBF1$ ، دارای نسبت طول دهانه به ارتفاع ۱ در چهار مدل با تغییرات شعاع از یک متر تا بی‌نهایت می‌باشند (شکل ۷-ب). (الف). قاب‌های گروه دوم $KBF1.5$ ، دارای نسبت طول دهانه به ارتفاع ۱.۵ هستند (شکل ۷-ب). و قاب‌های گروه سوم $KBF2$ ، دارای نسبت طول دهانه به ارتفاع ۲ می‌باشند (شکل ۷-ج). جزئیات هندسی مدل‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

رفتار عضو زانویی با شعاع انحنای مختلف طی ۱۲ مدل مختلف بررسی شدند. بررسی نحوه تاثیرگذاری انحنای المان زانویی بر روی عملکرد قاب فولادی به نحوی انتخاب گردید که طیف وسیعی از انحناها را در بر گرفته و میزان انحنا در طیف خطی بسیار کم، متوسط و زیاد قرار گیرد (شکل ۷). در تمام نمونه‌ها اتصال مهاربند به عضو زانویی به صورتی می‌باشد که راستای مهاربند از محل اتصال تیر و ستون عبور نماید. در تمام قاب‌ها، مشخصات اعضای تیر، ستون، مهاربند و زانویی



شکل ۶. توزیع کرنش پلاستیک معادل برای مدل تحلیلی نمونه آزمایش $KBF1, \infty$ در جابه‌جایی ۴۰ میلی‌متر

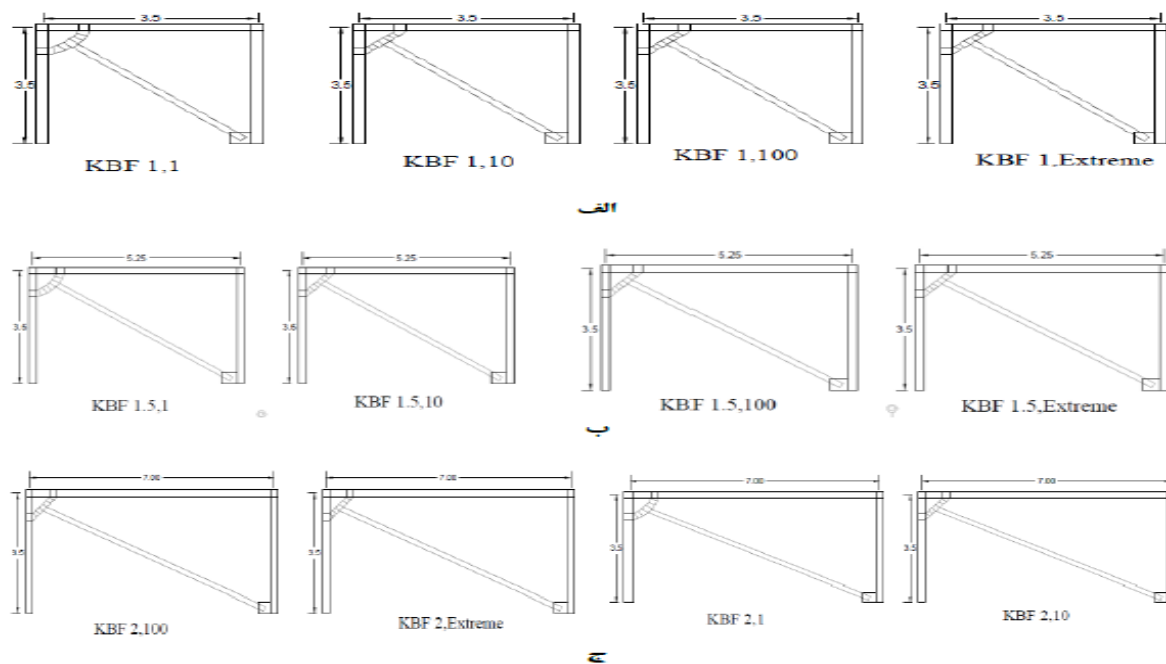
۳. توصیف مدل‌های تحلیلی مقایسه‌ای

در قاب‌های KBF وقتی نسبت ارتفاع به دهانه قاب همانند مدل ارائه شده آزمایشگاهی [۱۳] برابر یک باشد، مهاربند با زاویه قائمه، عضو زانویی را به دو قسمت مساوی تقسیم می‌کند. دو قسمت ایجاد شده در عضو زانویی شرایط کاملاً یکسانی داشته و لذا با هم به تسلیم می‌رسند. در نتیجه عضو زانویی می‌تواند حداکثر عملکرد خود را به نمایش بگذارد. اما در صورتی که نسبت ارتفاع به دهانه قاب برابر با یک نباشد با شرط عمود بودن مهاربند بر عضو زانویی و عدم تقسیم یکسان این عضو، قسمت کوتاه‌تر عضو زانویی به دلیل سختی بیشتر زودتر به حالت پلاستیک خواهد رسید در صورتی که قسمت بلندتر دیرتر به حالت پلاستیک خواهد رسید.

لذا این تحقیق به بررسی رفتار قاب‌های مهاربندی زانویی که اندازه دهانه قاب با ارتفاع آن برابر نیست و عضو زانویی دارای

و اتصالات تیر به ستون‌ها از نوع مفصلی است. الزامات (FEMA 2000) نیز برای جزئیات از پیش تایید شده مورد استفاده قرار گرفته است.

یکسان بوده و فقط شعاع انحنای عضو زانویی مختلف است. همچنین امتداد محل اتصال زانویی به تیر و ستون در تمامی مدل‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. نمونه‌ها با توجه به مقررات لرزه‌ای (AISC(2005)، مشابه با سیستم EBF طراحی



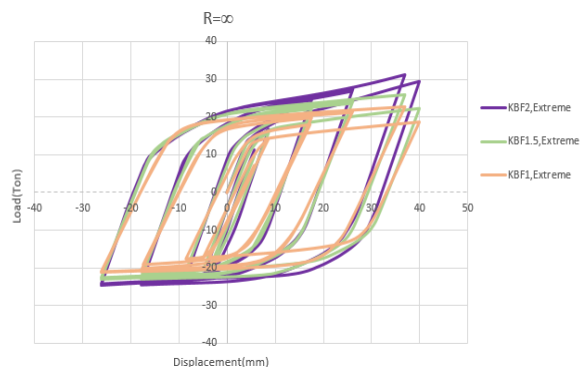
شکل ۷. نمای شماتیک نمونه‌های مختلف تحلیل قاب‌ها در مطالعات اجزا محدود

جدول ۳. جزئیات هندسی مدل‌ها

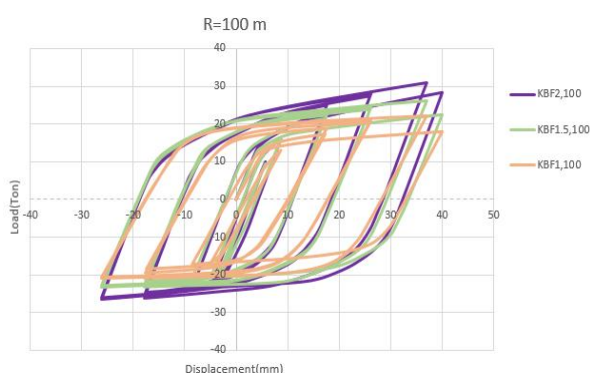
شماره مدل	نام مدل	تیر		ستون		زانویی		مهاربند	
		طول (میلیمتر)	مقطع	طول (میلیمتر)	مقطع	طول (میلیمتر)	مقطع	طول (میلیمتر)	مقطع
۱	KBF1,∞	۳۵۰۰	IPE180	۳۵۰۰	2IPE140	۹۳۴.۲	IPE120	۴۲۵۰	2UNP100
۲	KBF1,100	۳۵۰۰	IPE180	۳۵۰۰	2IPE140	۹۳۴.۲	IPE120	۴۲۵۳	2UNP100
۳	KBF1,10	۳۵۰۰	IPE180	۳۵۰۰	2IPE140	۹۳۴.۶	IPE120	۴۲۴۴	2UNP100
۴	KBF1,1	۳۵۰۰	IPE180	۳۵۰۰	2IPE140	۹۷۲.۱	IPE120	۴۰۴۱	2UNP100
۵	KBF1.5,∞	۵۲۵۰	IPE180	۳۵۰۰	2IPE140	۹۳۴.۲	IPE120	۵۵۳۹	2UNP100
۶	KBF1.5,100	۵۲۵۰	IPE180	۳۵۰۰	2IPE140	۹۳۴.۲	IPE120	۵۵۳۹	2UNP100
۷	KBF1.5,10	۵۲۵۰	IPE180	۳۵۰۰	2IPE140	۹۳۴.۶	IPE120	۵۵۲۹	2UNP100
۸	KBF1.5,1	۵۲۵۰	IPE180	۳۵۰۰	2IPE140	۹۷۲.۱	IPE120	۵۳۶۸	2UNP100
۹	KBF2,∞	۷۰۰۰	IPE180	۳۵۰۰	2IPE140	۹۳۴.۲	IPE120	۷۰۴۹	2UNP100
۱۰	KBF2,100	۷۰۰۰	IPE180	۳۵۰۰	2IPE140	۹۳۴.۲	IPE120	۷۰۴۸	2UNP100
۱۱	KBF2,10	۷۰۰۰	IPE180	۳۵۰۰	2IPE140	۹۳۴.۶	IPE120	۷۰۳۹	2UNP100
۱۲	KBF2,1	۷۰۰۰	IPE180	۳۵۰۰	2IPE140	۹۷۲.۱	IPE120	۶۸۸۹	2UNP100

۴. نتایج

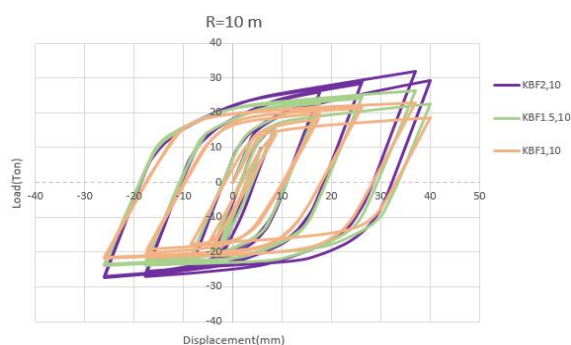
در شکل‌های ۸ الی ۱۴ منحنی‌های بار-جاب‌جایی نمونه‌های مدل شده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. هدف از مقایسه این نمودارها بررسی تاثیر تغییر شعاع انحنا بر رفتار قاب برای یک نسبت ثابت ارتفاع به دهانه و همچنین بررسی اثر تغییر طول دهانه برای یک شعاع ثابت می‌باشد.



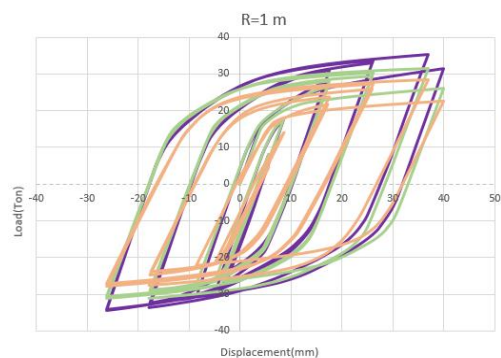
شکل ۱۱. منحنی هیستریزس مدل $R=\infty$



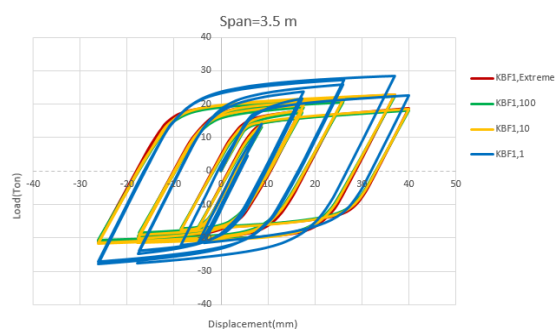
شکل ۱۲. منحنی هیستریزس مدل $R=100\text{ m}$



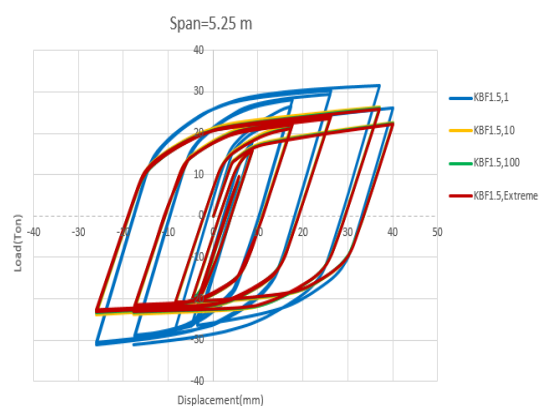
شکل ۱۳. منحنی هیستریزس مدل $R=10\text{ m}$



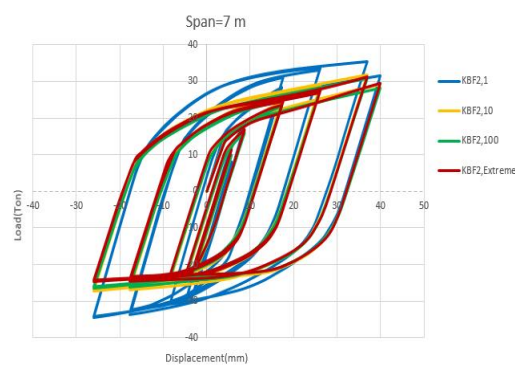
شکل ۱۴. منحنی هیستریزس مدل $R=1\text{ m}$



شکل ۸. منحنی هیستریزس مدل KBF1



شکل ۹. منحنی هیستریزس مدل KBF1.5

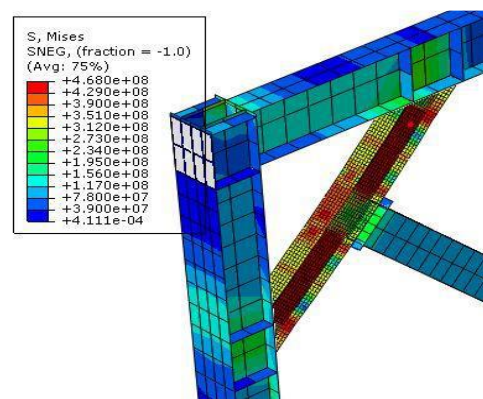


شکل ۱۰. منحنی هیستریزس مدل KBF2

با توجه به نمودارهای رسم شده، در تمام حالات، با افزایش نسبت طول دهانه به ارتفاع، با توجه به افزایش مساحت زیر منحنی اتلاف انرژی لرزهای افزایش یافته و به ظرفیت لرزه‌ای قاب‌ها افزوده شده است. همان طور که در نمودارهای بالا مشخص است، افزایش ظرفیت لرزهای قاب‌های با نسبت دهانه به ارتفاع ۲، از قاب‌های با نسبت دهانه به ارتفاع ۱.۵ و ۱ در تمامی مدل‌ها بیشتر بوده و همچنین با توجه به افزایش شیب

مدل	مقدار تغییر طول (mm)	مقدار تغییر عرض (mm)	مقدار تغییر ارتفاع (mm)
	(40mm)	(37mm)	(-26.1mm)
KBF2,1	31.57	35.43	-34.47
KBF2,10	29.23	31.85	-27.27
KBF2,100	28.25	30.84	-26.37
KBF2, ∞	29.45	31.23	-24.65
KBF1.5,1	26.14	31.53	-31.03
KBF1.5,10	22.51	26.28	-23.86
KBF1.5,100	22.4	26.06	-23.25
KBF1.5, ∞	22.26	25.89	-23.09
KBF1,1	22.62	28.48	-27.93
KBF1,10	18.62	22.93	-21.80
KBF1,100	18.09	22.29	-20.83
KBF1, ∞	18.74	22.78	-21.12

با توجه به کانتور تنش‌های فون میسر که به عنوان نمونه یکی از آن‌ها در شکل ۱۵ نشان داده شده است نقاط تمرکز تنش شناسایی شده و کرنش معادل پلاستیک برای این نقاط محاسبه شده است.



شکل ۱۵. کانتور تنش فون میسس نمونه $KBF_{1,\infty}$

است که قاب‌هایی که دارای عضو زانویی قوسی شکل می‌باشند نسبت به قاب‌هایی که عضو زانویی خطی دارند دارای عملکرد بهتری هستند. در بررسی عملکرد قاب‌ها در یک شعاع انحنای ثابت، با افزایش نسبت طول دهانه به ارتفاع، مقدار کرنش معادل پلاستیک افزایش می‌یابد که نشان دهنده عملکرد بهتر قاب‌های مربعی می‌باشد.

۵. نتیجه گیری

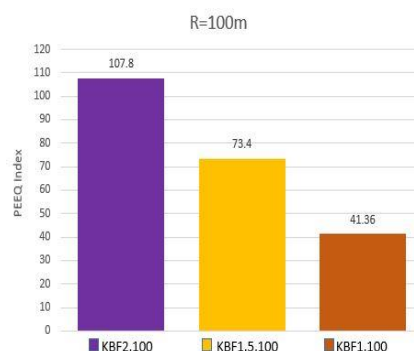
از نتایج تحلیل قاب‌های مذکور با روش اجزای محدود، مشخص شد که در همه‌ی قاب‌های مطالعه شده، با ثابت نگه داشتن طول دهانه، هرچه شعاع انحنا را در بازه بی‌نهایت تا یک متر کاهش دادیم با افزایش سطح زیر منحنی میزان شکل پذیری و استهلاک انرژی و با افزایش شیب و ارتفاع نمودار میزان سختی و مقاومت این قاب‌ها افزایش می‌یابد. در مقایسه نمونه‌ها با شعاع ثابت، با افزایش نسبت طول دهانه به ارتفاع، در تمامی مدل‌ها سختی، مقاومت، شکل پذیری و ظرفیت لرزه‌ای قاب‌ها افزایش خواهد یافت. در تمامی قاب‌ها، با مقایسه کرنش معادل پلاستیک، از شعاع ۱ متر تا شعاع بی‌نهایت، مقدار کرنش معادل پلاستیک افزایش یافته و قاب‌ها پتانسیل بیشتری برای گسیختگی نشان می‌دهند.

لذا نتیجه بدست آمده از تحقیق را میتوان به شکل زیر خلاصه کرد:

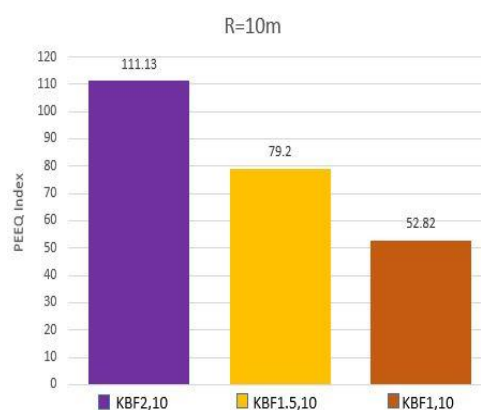
- در یک شعاع انحنای ثابت در تمامی مدل‌ها، استفاده از قاب‌های مستطیلی عملکرد لرزه‌ای بهتری را نسبت به قاب‌های مربعی نشان میدهند اما مقدار کرنش معادل پلاستیک بیشتری را نشان می‌دهد که در نتیجه این قاب‌ها پتانسیل بیشتری را برای ترک خوردگی دارا می‌باشند.

- عضو زانویی با شعاع انحنای یک متر (قوسی) نسبت به عضو زانویی با شعاع انحنای بینهایت (خط راست) عملکرد لرزه‌ای بهتری را نشان داده که این بهبود با افزایش نسبت طول دهانه به ارتفاع (یعنی تغییر قاب از مربعی به مستطیلی) افزایش می‌یابد.

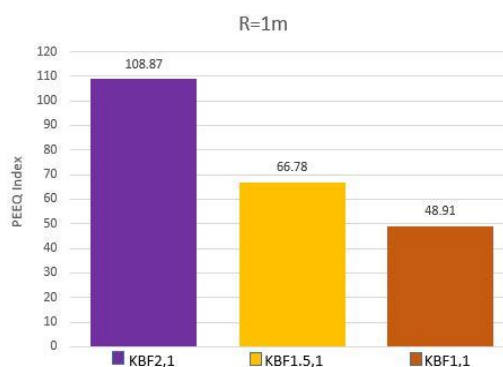
در قاب‌هایی با نسبت طول دهانه به ارتفاع ثابت، قاب‌های زانویی قوسی نسبت به قاب‌های با زانویی خط راست کرنش معادل پلاستیک کمتری را نشان داده و دیرتر گسیخته می‌گردند.



شکل ۱۷. بیشترین احتمال گسیختگی در شعاع R=100m



شکل ۱۸. بیشترین احتمال گسیختگی در شعاع R=10m



شکل ۱۹. بیشترین احتمال گسیختگی در شعاع R=1m

نتایج تحلیل حاکی از آن است که در تمام نمونه‌ها، با تغییرات شعاع انحنا از یک متر تا بی‌نهایت، مقدار کرنش معادل پلاستیک افزایش یافته و در نتیجه قاب‌ها پتانسیل بیشتری را برای ترک خوردگی از خود نشان می‌دهند. این بدان معنی

مراجع

- [13] Zahrai, M. and Jalali, M. (2014), "Experimental and analytical investigations on seismic behavior of ductile steel knee braced frames", *Steel and Composite Structures*, 16(1), pp. 1-21.
- [۱۴] سروش‌نیا، س. و بهشتیان، ن. (۱۳۹۱)، کامل‌ترین مرجع کاربردی ABAQUS، نگارنده دانش، تهران.
- [15] El-Tawil, S., Mikesell, T., Vidarsson, E., & Kunnath, S. K. "Strength and Ductility of FR Welded-Bolted Connections". SAC Joint Venture. 1998. Report No. SAC/BD-98/01.
- [16] Hancock, J. W and Mackenzie, A. C. (1976). "On the steels subjected to multi-axial stress-states". *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 24(2-3), 147-160.
- [17] Atashzaban, A., Izadinia, M., Ahmady Jazany, R., Hajirasouliha, I., (2016), " Seismic Performance of Drilled Flange Beam to Column Connections for Ductile Steel Frames". *Journal of Steel and Structure*, pp.53-65.
- [1] Contit, M.A. and Mastrandrea, L. and Piluso, V. (2009), "Plastic design and seismic response of knee braced frames", *Advanced Steel Construction*, 5(3), pp. 346-366.
- [2] Aristizabal-Ochoa, JD. (1986), " Disposable knee bracing: Improvement in seismic design of steel frames", *ASCE, Journal of structural engineering*, 112 (7), pp.1544-1552.
- [3] Mofid, M. and Khosravi, P. (2000), "Non-linear analysis of disposable knee bracing", *Computers and Structures*, pp. 65-72.
- [۴] دانشجو، ف. و عسگری، ج. (۱۳۸۲)، "رفتار غیر خطی قابهای با سیستم مهاربند زانویی تحت تأثیر زلزله"، استقلال، شماره ۲، صفحه ۱-۱۵.
- [5] Zhen, H. and Qing-song, L. and Long-zhu, CH. (2005), "Elastoplastic analysis of knee bracing frame" *Zhejiang University SCIENCE*, 6(8), pp. 784-789.
- [۶] جلالی، م. و زهرائی، م. (۱۳۸۷)، "مطالعه تحلیلی رفتار لرزه ای قاب های مهاربندی شده زانویی"، شریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، سال چهارم، شماره ۲، صفحه ۹۴-۸۷.
- [7] Naeemi, M. and Bozorgi, M. (2009), "Seismic performance of knee braced frame", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, pp. 976.-980.
- [۸] جلالی، م. و زهرایی، م. و میرقادری، ر. (۱۳۸۹)، "بررسی رفتار قاب های مهاربندی شده زانویی در مقابل بارهای جانبی"، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری - دانشکده فنی، دوره ۴۴، شماره ۱، صفحه ۲۷-۳۵.
- [۹] نوری، غ. و ناصری، ر. (۱۳۹۰)، "بررسی امکان استفاده از بادبندهای زانویی در تقویت سازه های فولادی موجود، با سیستم قاب خمشی ویژه"، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری - دانشکده فنی، دوره ۴۵، شماره ۷ صفحه ۸۳۵ - ۸۴۳.
- [10] Hejazi, M. and Memarzadeh, P. and Mohamadian, A. (2012), "Study of the effect of the length and position of knee elements on structural behavior of knee-braced steel frames and comparison with x-braced frames", *Proceedings of the 4th International Conference on Seismic Retrofitting*, Tabriz, Iran.
- [11] Anitha, M. and Divya, K. (2016), "Comparative study on seismic behaviour of steel knee braced frame eccentric braced frame", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, pp. 1-7.
- [12] Sheidaii, M. and TahamouliRoudsari, M. and Gordini M. (2016), "Investigation of the nonlinear seismic behavior of knee braced frames using the incremental dynamic analysis method", *Int J Adv Struct Eng*, 8, pp 151-159.