

## Seismic Performance Introducing a Seismic Bracing System in order to improve of Steel Frames

Mehdi Ghasvandani<sup>1</sup>, Mehdi Alirezaei<sup>2\*</sup>, Seyed Mohammad Mirhosseini<sup>3</sup>, Ehsanolah Zeighami<sup>3</sup>

1- PhD candidate, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Arak, Iran

2 - Assistant professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Malayer, Iran

3 - Assistant professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Arak, Iran

### ABSTRACT

One way to reduce seismic force is to use knee-braced systems. In this method, the diagonal members of the brace are connected to the knee member. The function of the bracing members is to create stiffness and the function of the knee member is to create ductility like a yielding damper. In this method, we achieved new results by combining Y-shaped braces with knee members. In this regard, three specimens of the proposed bracing frame were experimentally tested in accordance with the ATC24 loading protocol at the structural laboratory. The results confirm the optimal performance of this seismic system along with energy absorption and appropriate behavior in the stability of this design and has a good capacity in energy dissipation and, the knee element begins the process of energy absorption faster at lower frame displacements. The use of a knee-braced system can be a good alternative to the brace system due to its ease of replacement. The behavior of the deformation-force hysteresis curves provides good results. Experimental experiments showed that this system will have a large force adjustment. The proposed frame compositions do not have the initial stiffness and high strength, so they will also perform well subjected to low-magnitude earthquakes. By examining the different values of the structures' responses, the mechanism of structural failure in the plastic zone of the knee-braced system had acceptable ductility. Also, in this type of brace, it was shown that by moving the middle knot towards the corner of the frame and increasing the eccentricity of this point, the stiffness of the frame is reduced. As a result, the natural vibration period of the brace increases and consequently the displacement of the system under constant load increases.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 31 December 2021

**Revise Date:** 01 May 2022

**Accept Date:** 20 June 2022

### Keywords:

knee bracing frame  
(Y type) bracing frame  
hysteresis curve  
experimental studies  
stiffness and ductility

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.322315.2683>

\*Corresponding author: Mehdi Alirezaei

Email address: M.Alirezaei@iau-malayer.ac.ir

## معرفی یک سیستم لرزه بر مهاربندی شده به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای در قاب‌های فولادی

مهدی غیاثوندان<sup>۱</sup>، مهدی علیرضایی<sup>۲\*</sup>، سید محمد میرحسینی<sup>۳</sup>، احسان‌الله ضیغمی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترای سازه، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد ملایر، دانشگاه آزاد اسلامی، ملایر، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

### چکیده

یکی از روش‌های کاهش نیروی زلزله استفاده از سیستم‌های قاب مهاربندی زانویی می‌باشد. در این روش، اعضای قطری مهاربند به عضو زانویی متصل می‌شود. وظیفه اعضای مهاربندی ایجاد سختی و وظیفه عضو زانویی ایجاد شکل‌پذیری همانند یک میراگر تسلیم‌شونده می‌باشد. در این روش با ترکیب مهاربندهای دروازه‌ای (Y شکل) با اعضای زانویی به نتایج جدیدی دست یافتیم. در این راستا سه نمونه قاب مهاربندی پیشنهادی در محل آزمایشگاه سازه تحت آزمایش تجربی مطابق پروتکل بارگذاری ATC-24 قرار گرفت که نتایج مؤید عملکرد مطلوب این سیستم لرزه‌ای به همراه جذب انرژی و رفتار مناسب در پایداری این طرح می‌باشد و از ظرفیت خوبی در استهلاک انرژی برخوردار است و در جابجایی‌های کمتر قاب، المان زانویی سریعتر فرایند جذب انرژی را آغاز می‌نماید. استفاده از سیستم مهاربند زانویی به دلیل راحتی در تعویض می‌تواند جایگزین مناسبی برای سیستم مهاربندی باشد. رفتار منحنی‌های هیستریزس تغییرشکل-نیرو نتایج مطلوبی حاصل می‌نماید که آزمایشات تجربی نشان داد که این سیستم دارای تعدیل نیروی فراوان خواهد بود. ترکیب قاب پیشنهادی چون سختی اولیه و مقاومت بالایی ندارند، بنابراین در زلزله‌های با شدت کم نیز عملکرد خوبی خواهند داشت. با بررسی مقادیر مختلف پاسخ‌های سازه‌ها، مکانیزم شکست سازه در محدوده قسمت پلاستیک سیستم مهاربند زانویی از شکل‌پذیری قابل قبولی برخوردار بودند. همچنین در این نوع مهاربند نشان داده شد که با حرکت کردن گره میانی به سمت گوشه قاب و افزایش خروج از مرکزیت این نقطه، سختی قاب کمتر شده و در نتیجه پیوند ارتعاش طبیعی مهاربند افزایش و در پی آن جابجایی سیستم تحت بار ثابت افزایش می‌یابد. در جهت سنجش روش پیشنهادی با سیستم‌های رایج یک قاب با مهاربند قطری نیز در نرم افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی گردید که نتایج نشان دهنده رفتار خوب این سیستم است.

کلمات کلیدی: قاب مهاربند زانویی، قاب مهاربند دروازه‌ای (Y شکل)، منحنی هیستریزس، مطالعات تجربی، سختی و شکل‌پذیری.

| doi:                           | سابقه مقاله:                                   |            |               |            |            |
|--------------------------------|--|------------|---------------|------------|------------|
|                                | شناسه دیجیتال:                                 | چاپ        | انتشار آنلاین | پذیرش      | بازنگری    |
| 10.22065/jsce.2022.322315.2683 | https://doi.org/10.22065/jsce.2022.322315.2683 | ۱۴۰۲/۰۱/۳۱ | ۱۴۰۱/۰۳/۳۰    | ۱۴۰۱/۰۳/۳۰ | ۱۴۰۱/۰۲/۱۱ |
| 10.22065/jsce.2022.322315.2683 |  |            |               |            | ۱۴۰۰/۱۰/۱۰ |

\* نویسنده مسئول:

M.Alirezai@iau-malayer.ac.ir

پست الکترونیکی:

## ۱- مقدمه

یکی از روش‌های رایج برای مقابله با نیروهای جانبی در سازه‌های فولادی، استفاده از مهاربندها است. قاب با مهاربند زانویی (KBF) یکی از انواع مهاربند هاست که در سال ۱۹۸۶ توسط آریستزابل اچوا مطرح گردید که شامل قاب با مهار قطری است که یک یا هر دو انتهای عضو قطری به عضو زانویی متصل می‌گردد. سیستم مذکور به جای اتصال برشی، از یک عضو سازه‌ای ثانویه (عضو زانویی) به عنوان فیوز سازه‌ای که در واقع نوعی میراگر تسلیم شونده می‌باشد بهره‌مند است. سختی از طریق عضو قطری و شکل‌پذیری از طریق تسلیم خمشی یا برشی عضو زانویی تأمین می‌شود. مشکل عمده سیستم پیشنهادی اچوا لاغری عضو قطری بود که در فشار سریعاً کمانش می‌نمود و برای طرح لرزه‌ای مناسب نبود [۱]. در سال ۱۹۹۰ بالندرا با انجام تغییراتی در سیستم فوق و استفاده از یک عضو قطری که جلوی کمانش آن گرفته شده است را معرفی نمود [۲]. زهرایی و جلالی در یک بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی، مطالعاتی را روی رفتار غیرارتجاعی قاب‌های مهاربندی شده زانویی انجام دادند ایشان با بررسی دو نمونه آزمایشگاهی، میزان میرایی ویسکوز معادل برای قاب‌های مهاربندی شده زانویی را ۲۳ درصد تعیین نمودند [۳]. رشیدی در یک بررسی پارامتری در خصوص رفتار مهاربندهای زانویی نشان داد ستون‌ها مهم‌ترین المان‌های قاب هستند و مفاصل پلاستیک ابتدا در عضو زانویی سپس در عضو قطری و در آخر در تیر تشکیل می‌شود [۴]. بیاتی و رضایی پس از بررسی مهاربندهای ضربدری، قطری، شورون و K شکل که همگی متصل به زانویی بودند، نشان دادند بهترین عملکرد متعلق به مدل مهاربند ضربدری متصل به مهاربند زانویی می‌باشد [۵]. حجازی و همکاران در بررسی مهاربندهای زانویی تعیین نمودند در حالتی که عضو زانویی در دوطرف مهاربند قرار می‌گیرد سازه دارای سختی کمتری می‌باشد که این به دلیل وجود دو عضو شکل‌پذیر در سازه است و وقتی المان زانویی در عضو پایین مهاربند قرار داشته باشد تغییر مکان‌ها بیشتر از زمانی است که در بالای مهاربند قرار دارد [۶]. حسینی هاشمی و علیرضایی در مطالعه‌ای در خصوص مهاربندهای زانویی پیشنهاد دادند که با ترکیب مهاربند برون‌محور و زانویی، سازه می‌تواند تحت طراحی دو سطحی عمل نماید به طوری که در زلزله‌های ضعیف تا متوسط زانویی عملکرد داشته و در زلزله‌های شدید تیر پیوند فعال می‌شود. [۷ و ۹] غفوری‌نژاد و همکاران در تحقیقی در ترکیب مهاربند زانویی و نوعی میراگر اصطکاکی نشان دادند که اتلاف انرژی، سختی الاستیک و استحکام قاب با افزایش طول زانویی کاهش می‌یابد اما، این پارامترها با انتخاب میراگری قوی‌تر و با ثابت نگه داشتن طول زانویی افزایش می‌یابد [۱۰]. هنما و همکاران در مطالعه‌ای پس از شانه‌ای کردن و تغییر در جان المان زانویی تحت بارگذاری چرخه‌ای دریافتند که قسمت‌های شانه‌ای زودتر تسلیم می‌شوند، علاوه بر این، با استفاده از قانون ماینر و منحنی شکنندگی فولاد مصرفی، عمر خستگی زانویی را پیش‌بینی کردند [۱۱]. محمودی و همکاران در طرح پیشنهادی خود مبنی بر ترکیب مهاربند ضربدری و زانویی‌ها با میله‌های آلیاژی به این نتیجه رسیدند که استفاده از چنین عناصری، به طور قابل توجه در سختی، استحکام و شکل‌پذیری تأثیرگذار نیست. این اعضا فقط می‌توانند در بهبود وضعیت مفاصل پلاستیک مؤثر باشند [۱۲]. چوندا و همکاران در ترکیب قاب‌های فولادی و المان‌های زانویی کمانش‌ناپذیر تحقیقاتی نمودند، این روش می‌تواند با یک پاسخ هیسترتیک پایدار به صورت انعطاف‌پذیر رفتار کند. این سیستم قاب-بندی باید طوری طراحی شود که در برابر برش عمودی و بار محوری ناشی از تیرها مقاومت کند. این پیکربندی‌ها می‌تواند برای سطوح مختلف مقاومت، سختی و شکل‌پذیری استفاده گردد [۱۳]. لیلاتاویات و همکاران در تحقیقی در مورد ترکیب قاب‌های خمشی فولادی و المان‌های زانویی بررسی کردند که این سیستم سازه‌ای منجر به رفتار شکل‌پذیر می‌شود، در این سیستم، مفاصل پلاستیک تیرها در انتهای تیر قرار می‌گیرد و زانویی‌ها نیز سختی کمتری نسبت به مهاربندهای معمولی ایجاد می‌کند و این سیستم سازه‌ای را از لحاظ معماری و بازشو جذاب می‌کند [۱۴]. اصغری و سحرخیزان در بررسی رفتار چرخه‌ای ارزیابی عملکرد قاب با اتصال زانویی نتیجه گرفتند که استفاده از المان زانویی نسبت به اتصالات صلب متداول که حالت متمرکز دارند با ایجاد یک اتصال صلب ناحیه‌ای توانسته است نیروها را در سطح وسیع‌تری که در منطقه المان زانویی ناحیه مشترک گره اتصال تیر به ستون است توزیع کرده و به این ترتیب شدت تنش‌ها را در ناحیه اتصال کاهش دهد [۱۵]. حقایق و همکاران در بررسی رفتار مهاربندهای زانویی با شورون و ضربدری نشان دادند، قاب فولادی با مهاربند زانویی به نسبت مهاربند ضربدری و شورون میزان سختی لازم و شکل‌پذیری را توأمان تأمین می‌نماید [۱۶]. صاحبی و منتظری در ارزیابی عملکرد مهاربند زانویی مجهز به میله‌های آلیاژی نشان دادند باعث کاهش جابجایی نسبی و مطلق سازه و در نتیجه افزایش اندک ظرفیت شکل‌پذیری می‌شود [۱۷]. سیلوا و همکاران در بررسی ساختمان‌های فولادی طراحی شده با مهاربندهای شورون نشان دادند، تا ۴۰ درصد

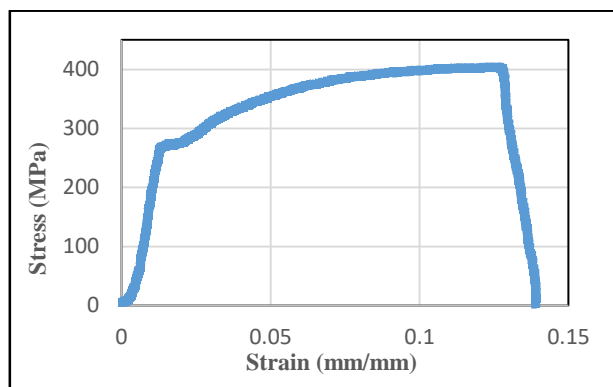
تلفات انسانی را کاهش می‌دهد که ارزش طراحی با چنین سطح عملکردی رضایت بخش به نظر نمی‌رسید [۱۸]. بسطامی و همکاران در تحقیقات خود بر روی مهاربندهای هم‌محور نشان‌دادند با استفاده از یک ورق نازک با ارتفاع متوسط به عنوان فیوز سازه‌ای می‌توان از آسیب به اجزای اصلی سازه همچون تیر و ستون جلوگیری نمود [۱۹ و ۲۰ و ۲۱]. نکته مهم طراحی این سیستم، مشخص شدن نوع شکست (برشی یا خمشی) برای المان زانویی است. از معیارهای مهمی که حالت رفتاری المان زانویی را مشخص می‌نماید طول عضو زانویی است. برای وقوع تسلیم خمشی، طول کل عضو زانویی از  $4M_p/V_p$  بزرگتر در نظر گرفته می‌شود و برای وقوع تسلیم برشی طول عضو زانویی باید از  $(M_p/V_p)^{3/2}$  کوچکتر باشد که  $M_p$  و  $V_p$  به ترتیب ظرفیت خمشی و برشی پلاستیک عضو زانویی است [۲۲]. همچنین با توجه به نتایج کارهای زهرائی، لطف‌اللهی و مفید، زهرائی و جلالی نیز می‌توان دریافت که حالت تسلیم برشی عملکرد مناسب‌تری نسبت به تسلیم خمشی دارد [۲۳ و ۲۴]. یکی دیگر از انواع مهاربندهای جانبی سیستم‌های دروازه‌ای می‌باشد که به نام‌هایی دیگر همچون پرده‌ای، خیمه‌ای یا Y شکل شهرت دارد. از مشکلات استفاده از مهاربندهای مرسوم، بروز مشکل در تأمین بازشوها است که مورد انتقاد معمارها می‌باشد، عدم وجود ضوابط مدون در آئین نامه‌های موجود برای طراحی لرزه‌ای این سیستم مهاربندی، ضرورت بررسی عملکرد این سیستم را بیشتر می‌کند. یکی از مزیت‌های مهاربندهای دروازه‌ای تأمین بیشتر بازشوها به تناسب دیگر روش‌های مهاربندی لرزه‌ای است [۲۵ و ۲۶]. پایداری این قاب‌ها در صفحه قاب، مشابه انواع دیگر مهاربندهای محوری قابل بررسی است. در قاب‌های با مهاربندی دروازه‌ای اتصال اعضای قاب و اتصال اعضای مهاربندی به گوشه‌های قاب مفصلی فرض می‌گردد. موقعیت اتصال اعضای مهاربندی به یکدیگر (گره میانی) فضای بازشوی قاب را تعیین می‌کند. زمانی و همکاران به بررسی رفتار لرزه‌ای مهاربندهای دروازه‌ای و مقایسه آن با مهاربند ضربداری پرداختند. نتایج نشان می‌دهد هر چه نقطه تلاقی مهاربندها به وسط دهانه قاب انتقال یابد، سختی الاستیک قاب و بار کمانشی افزایش می‌یابد. از دیگر نتایج این پژوهش کاهش بلندشدگی ستون‌های قاب با مهاربند دروازه‌ای نسبت به قاب با مهاربند ضربداری است. ایشان در پژوهشی دیگر به بررسی رفتار لرزه‌ای اینگونه مهاربندها و مقایسه آن با مهاربند شورون پرداختند. نتایج نشان داد در مهاربندهای دروازه‌ای با وجود مقاطع مختلف به کار رفته و جزئیات مختلف در اتصالات آنها به یکدیگر، کمانش خارج از صفحه مد غالب رفتاری است. در نمونه مهاربندی دروازه‌ای با ورق‌های اتصال تکی چرخش‌های پلاستیک قابل ملاحظه‌ای به وجود می‌آید. استفاده از ورق‌های دابل اتصال توانستند مانعی برای کمانش خارج از صفحه قاب باشند [۲۷ و ۲۸]. یکی از اشکالات این سیستم کمانش خارج از صفحه آنهاست که مونولاچه و همکاران در تحقیقی برای جلوگیری از کمانش و اصلاح رفتار عضو مرکزی این مهاربندها طرحی نو ارائه نمودند [۲۹]. کاظمی رفتار الاستیک دو بعدی مهاربند Y شکل را بررسی نمودند. در این مطالعه پس از ارزیابی مختصر مزایا و معایب این نوع مهاربند نشان دادند که با حرکت کردن گره میانی به سمت گوشه قاب و افزایش خروج از مرکزیت این نقطه، سختی قاب کمتر شده و در نتیجه پیوند ارتعاش طبیعی مهاربند افزایش و در پی آن جابجایی سیستم تحت بار ثابت افزایش می‌یابد [۳۰]. کیوان و ژنگ در تحقیقی که به روش آزمایشگاهی و المان محدود انجام گرفت در خصوص مهاربندهای Y شکل نشان دادند این نوع مهاربند برای ساختمان‌های با ارتفاع کم و متوسط کاربرد دارد [۳۱]. ژیا و همکاران به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی Y شکل با استفاده از فولادهای متفاوت و نیز مقایسه با مهاربند برون‌محور نتیجه گرفتند ظرفیت اتلاف انرژی قاب Y شکل بهتر از سیستم برون‌محور بوده و توانایی استهلاک انرژی بیشتری نیز دارد. همچنین از تعمیر پس از زلزله ساده‌تر برخوردار و صرفه‌جویی در مصرف فولاد نیز دارد [۳۲]. شهیدی‌تبار و محرمی نوعی مهاربند که از ترکیب میراگرهای اصطکاکی با مهاربند Y شکل تشکیل می‌شد را معرفی نمودند، این میراگرها از نوع فترهای از پیش فشرده می‌باشد. در این طرح همه اعضای مهاربند تیر و ستون در حالت الاستیک قرار می‌گرفت. در این مطالعه مشخص شد مهاربندهایی که از ترکیب میراگرهای اصطکاکی بودند دارای حلقه‌های هیستریزیس پایداری می‌باشد که سطح ثابتی از اتلاف انرژی را تضمین می‌کند [۳۳]. رامین، جهت کنترل طبقه نرم و کاهش دررفت سازه‌های بتنی از ترکیب مهاربندهای Y شکل استفاده کرد و نتایج نشان داد که رفتار این سیستم از یک الگوی سختی غیرخطی با دو تسلیم پیروی می‌کند و این سیستم برای سازه‌های تا ۱۰ طبقه کاملاً مناسب است اما برای سازه‌های بلندتر مطلوب نمی‌باشد [۳۴]. لی و همکاران در بررسی خود در خصوص ترکیب قاب‌های فولادی با زانویی‌ها نشان دادند که سازه‌های قابی با اتصالات زانویی دارای یک عملکرد لرزه‌ای مطلوب به دلیل شکل‌پذیری اتصالات و زانویی‌ها هستند، ولی توصیه می‌شود در سازه‌هایی که بیش از شش طبقه دارند از تقویت‌کننده‌های اضافی نیز استفاده شود [۳۵].

## ۲- معرفی روش پیشنهادی

۱-۲- اهداف پژوهش: هدف از این پژوهش، بهبود رفتار مهاربند دروازه‌ای است که ویژگی خاص در تأمین فضای بازشوها در معماری ساختمان‌ها را دارد، در ترکیب با مهاربندهای زانویی که از شکل‌پذیری بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. در این تحقیق استفاده از ساختار نرم مهاربند دروازه‌ای، در ترکیب با المان زانویی با نام اختصاری (KCBF) باعث افزایش بازه حرکتی زانویی می‌گردد تا اتلاف انرژی راحت‌تر صورت پذیرد، شکل‌پذیری و انرژی کرنشی غیرخطی در سازه نیز افزایش یابد. ضمن آنکه طراحی المان پیشنهادی به گونه‌ای خواهد بود که از ورود همه اجزای سازه در کنترل نیروی لرزه‌ای از جمله کمناش اعضای فشاری مهاربندها جلوگیری نموده و با تسلیم شدن و جذب انرژی، از کمناش مهاربند جلوگیری می‌کند. از آنجایی که مهاربندهای برون‌محور (EBF) به دلیل حضور تیر پیوند در تراز سقف در هنگام زلزله و جاری شدن با مشکلات و سختی فراوان تعویض روبروست، در این تحقیق به دلیل حضور عضوی که ضمن دارا بودن کارایی و قابلیت مناسب، تهیه و نصب آن به راحتی امکان پذیر باشد و به سادگی نیز در زلزله‌ها پس از تسلیم نیز قابل تعویض باشد مورد نظر نویسندگان پژوهش بوده است.

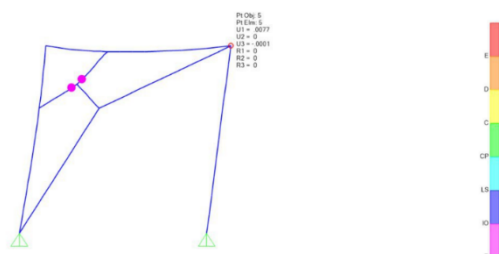
۲-۲- میراگرهای فلزی (تسلیمی): در این میراگرها از تغییرشکل غیرالاستیک فلزات شکل‌پذیر مانند فولاد جهت اتلاف انرژی استفاده می‌شود. با استفاده از این نوع میراگر، انرژی منتقل شده به سازه صرف تسلیم و ایجاد رفتار غیرخطی در قطعات بکار رفته در میراگر می‌گردد. این در حالی است که در تمام سازه‌های فولادی مرسوم، اتلاف انرژی بر اساس شکل‌پذیری اعضای فولادی پس از تسلیم متکی است. این میراگرها، به علت سهولت اجرا و عدم وابستگی به تکنولوژی پیچیده تولید از زمره ساز و کارهایی است که در صورت اجرای صحیح و مناسب نه تنها با شرایط ساخت و ساز همساز می‌دارند، بلکه دارای مزایایی مانند عدم نیاز به بازرسی و نگهداری، قابلیت اتلاف انرژی قابل توجه، عدم وابستگی به فناوری پیچیده تولید، تأمین مصالح اقتصادی و اجرایی می‌باشد که در این مطالعه از المان زانویی متشکل از مقطع IPE که برخوردار از خصوصیت ارزانی و در دسترس بودن می‌باشد استفاده گردیده که در ترکیب با یک سیستم مهاربندی، نقش جاذب و اتلاف‌کننده انرژی را بر عهده دارد و به عنوان یک فیوز در سازه عمل که با تمرکز رفتار غیرخطی در خود، مانع از بروز رفتار غیرخطی و آسیب در سایر اجزای اصلی و فرعی سازه می‌گردد. این المان طوری طراحی می‌شود که قبل از آنکه مهاربند به بار بحرانی خود برسد.

۲-۳- قاب‌های پیشنهادی و مقاطع: در این مطالعه سه نمونه قاب KCBF بر اساس مقیاس دو سوم به صورت یک دهانه، یک طبقه، شامل مهاربندی Y شکل (دروازه‌ای) در ترکیب با مهاربند زانویی در نظر گرفته شد. در مجموع نمونه‌ها به روش تجربی تحت آزمایش قرار می‌گیرد که تفاوت آنها در موقعیت نقطه همگرایی سه مهاربند است. مصالح مورد مصرفی از نوع فولاد ST37 با چگالی  $7850 \text{ kg/m}^3$ ، مدول الاستیسیته  $E=200 \text{ GPa}$ ، ضریب پواسون  $\nu=0.3$  و تنش تسلیم آنها به طور میانگین با توجه به نتایج آزمایشگاهی صورت‌گرفته مطابق شکل شماره ۱، ۲، ۲۷۲ مگاپاسکال می‌باشد.



شکل ۱: منحنی تنش کرنش آزمایش شده از مصالح مورد استفاده

جهت طراحی اولیه مقاطع و قاب ابتدا با استفاده از دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه شماره ۳۶۰) پس از تحلیل قاب در نرم افزار SAP2000 با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی، ظرفیت تسلیم زانویی پس از تشکیل اولین مفصل پلاستیک در محل زانویی محاسبه گردید و دیگر المان‌های قاب نیز با استفاده از ظرفیت نهایی عضو زانویی طراحی شد. در قاب با مهاربندهای معمولی، مفصل پلاستیک، در اعضای اصلی مهاربندها تشکیل می‌شود، اما همانگونه که در شکل شماره ۲ مشاهده می‌شود، در قاب با المان پیشنهادی اولین تسلیم‌ها در زانویی ایجاد گردیده و تیرها، ستون‌ها و مهاربندها در حالت الاستیک و بدون کماتش باقی مانده است.



شکل ۲: مدل‌سازی در SAP2000 و تشکیل اولین مفصل پلاستیک در زانویی

مهاربندها در این دهانه نیروکنترل می‌باشند و کرانه پایین مقاومت فشاری آنها به روش استاتیکی محاسبه می‌شود. جهت محاسبه سختی و مقاومت در روش‌های غیرخطی، مدل‌سازی سازه بر اساس رابطه نیرو-تغییرشکل قطعات که به صورت روابطی غیرخطی بیان می‌شوند، انجام می‌گردد. برای بدست آوردن تغییرشکل-نیرو در بارگذاری استاتیکی غیرخطی، از روابط دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰) استفاده گردیده است. مدل رفتار غیرخطی زانویی بر اساس مقاومت مورد انتظار  $Q_{CE}$ ، در مقابل چرخش تعریف می‌شود. در سیستم (KBF) عضو زانویی در حقیقت نقش تیر پیوند در سیستم (EBF) را دارد و بسته به طول و مشخصات مقطع در برش و یا خمش تسلیم می‌گردد، با استفاده از رابطه ۱ تعیین گردید که در این قاب، المان زانویی به صورت خمشی تسلیم خواهد گردید:

$$e > \frac{2.6M_{CE}}{V_{CE}} \quad (1)$$

$$Q_{CE} = V_{CE} = 2 \frac{M_{CE}}{e} \quad (2)$$

$e$  معادل نصف طول المان زانویی و  $M_{CE}$  و  $V_{CE}$  به ترتیب ظرفیت خمشی مورد انتظار و برش نظیر ظرفیت خمشی مورد انتظار المان زانویی می‌باشد. زاویه چرخش تیر پیوند در حد تسلیم، از رابطه شماره ۳ به دست می‌آید. در این رابطه  $K_e$ ، سختی ارتجاعی زانویی است.

$$\theta_y = \frac{Q_{CE}}{K_e e} \quad (3)$$

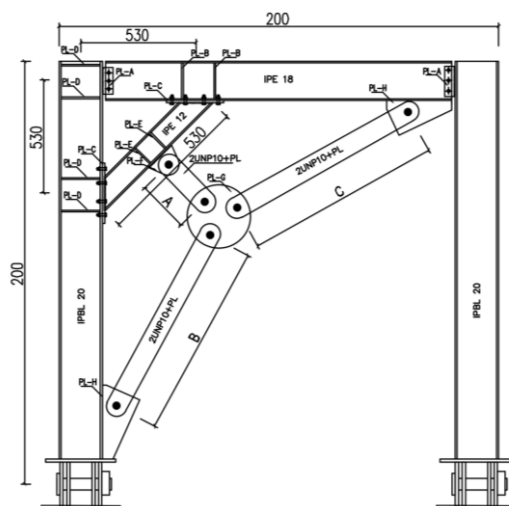
$$K_e = \frac{K_s K_b}{K_s + K_b} \quad (4)$$

$$K_s = \frac{GA_w}{e} \quad (5)$$

$$K_b = \frac{12EI_b}{e^3} \quad (6)$$

$t_w$ : ضخامت جان  $(d_b - 2t_f)$   $t_w$ : ضخامت برشی  $G$ : مدول برشی  $K_e$ : سختی المان زانویی  $K_b$ : سختی خمشی  $d_b$ : ارتفاع مقطع تیر  $t_f$ : ضخامت بال  $t_w$ : ضخامت جان

اجزای مدل قاب پیشنهادی در شکل شماره ۳ نشان داده شده است:



شکل ۳: قاب پیشنهادی مورد آزمایش

ابعاد قاب، مهاربند و مقاطع مورد استفاده در جدول‌های شماره ۱ و ۲ و ابعاد ورق‌های اتصال در جدول شماره ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱: مقاطع قاب‌های مورد آزمایش

| نمونه آزمایشی | Column | Beam  | Brace           | A (cm) | B (cm) | C (cm) |
|---------------|--------|-------|-----------------|--------|--------|--------|
| نمونه شماره ۱ | IPBL20 | IPE18 | 2UNP10+PL95×8×1 | 0      | 97     | 99     |
| نمونه شماره ۲ | IPBL20 | IPE18 | 2UNP10+PL90×8×1 | 12     | 92     | 94     |
| نمونه شماره ۳ | IPBL20 | IPE18 | 2UNP10+PL88×8×1 | 24     | 89     | 91     |

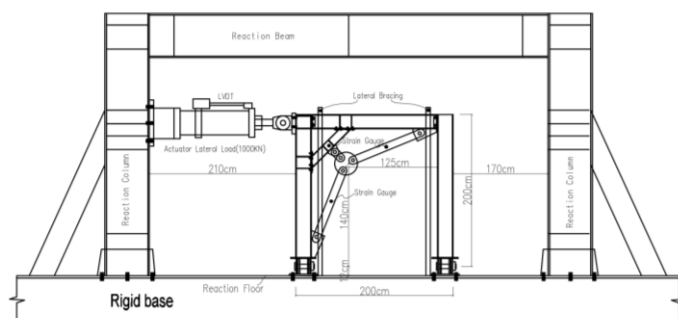
جدول ۲: مشخصات هندسی مقاطع

|          | ارتفاع مقطع<br>h (cm) | طول بال<br>b (cm) | ضخامت بال<br>t (cm) | ضخامت جان<br>s (cm) | سطح مقطع<br>A (cm <sup>2</sup> ) | ممان اینرسی<br>Ix (cm <sup>4</sup> ) | ممان اینرسی<br>Iy (cm <sup>4</sup> ) | اساس مقطع<br>Sx (cm <sup>3</sup> ) | اساس مقطع<br>Sy (cm <sup>3</sup> ) |
|----------|-----------------------|-------------------|---------------------|---------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| IPE 180  | 180                   | 91                | 0.8                 | 0.53                | 23.9                             | 1320                                 | 101                                  | 146                                | 22.2                               |
| IPE 120  | 120                   | 64                | 0.63                | 0.44                | 13.2                             | 318                                  | 27.7                                 | 53                                 | 8.65                               |
| IPBL 200 | 190                   | 200               | 1                   | 0.65                | 53.8                             | 3690                                 | 1340                                 | 389                                | 134                                |
| UNP 100  | 100                   | 50                | 0.85                | 0.6                 | 13.5                             | 206                                  | 29.3                                 | 41.2                               | 8.49                               |

جدول ۳: ابعاد ورق‌های اتصال

| نام قطعه | ابعاد (cm) | نام قطعه | ابعاد (cm) | نام قطعه | ابعاد (cm) | نام قطعه | ابعاد (cm)   |
|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|--------------|
| PL-A     | 15×6×1     | PL-B     | 16.5×5×0.8 | PL-C     | 25×15×1    | PL-D     | 18×10×0.8    |
| PL-E     | 10×3×0.8   | PL-F     | 15×15×0.8  | PL-G     | R=15       | PL-H     | 35×5×30×18×1 |

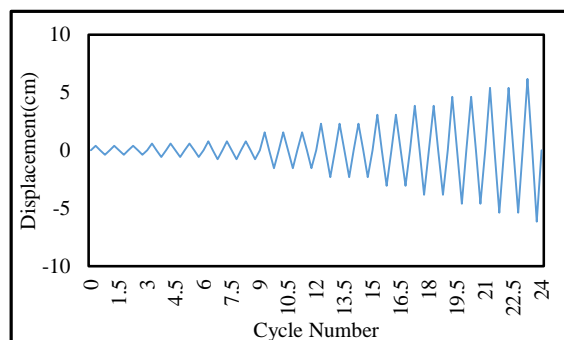
هندسه قاب تحت آزمایش در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. آزمایشگاهی که آزمایش ها در آن انجام می شد، توانایی داشت بار جانبی تا ۱۰۰۰kN را به صورت استاتیکی رفت و برگشتی اعمال نماید.



شکل ۴: هندسه سازه بر روی کف صلب و قاب بارگذاری جهت آزمایش

### ۳- بارگذاری و آزمایش تجربی

تعیین تغییر مکان هدف با استفاده از روش طیف ظرفیت آیین نامه ATC-24 [۳۶] برای قاب ۶ سانتی متر در نظر گرفته شد. پروتکل بارگذاری طبق نمودار بارگذاری اعمالی بر اساس آیین نامه فوق الذکر مطابق شکل شماره ۵ تهیه و در دستگاه دیتالاگر بارگذاری گردید.



شکل ۵: تاریخچه بارگذاری

اشکال شماره ۶، ۷ و ۸ مهاربندهای ساخته شده را نشان می دهد که بر روی قاب بارگذاری نصب گردیده اند. در جهت جلوگیری از ایجاد سختی خمشی، اتصالات پای ستون ها و مهاربندها به صورت مفصلی با استفاده از پین مطابق شکل های شماره ۹ و ۱۰ نصب می گردد، تا چرخش در صفحه آزاد را فراهم کند، اما چرخش در جهت عمود بر قاب میسر نباشد. جهت جلوگیری از کمناش قاب در جهت عمود بر صفحه، چهار پایه خرابایی نصب می گردد تا اثر دیافراگم کف طبقه شبیه سازی شود. بر روی اعضای مهاربندی و زانویی، کرنش سنج های (Strain Gauges) نصب می گردد و برای قرائت مقادیر جابجایی های اعمال شده لحظه ای در اجزا و قاب، مطابق شکل شماره ۱۱ جابجایی سنج هایی (LVDT) نصب می شود. جهت جلوگیری از اندرکنش زیاد بین قاب و سیستم مهاربندی، اتصال تیرها به ستون بصورت مفصلی و با استفاده از ورق جان و پیچ های پرمقاومت صورت گرفته است. کلیه اتصالات مهاربندها به صفحات مهاربندی، ستون به صفحه ستون توسط پین به صورت مفصلی و لولایی استفاده می شود. المان زانویی نیز توسط پیچ های پرمقاومت به تیر و ستون متصل گردیده تا قابلیت تعویض را داشته باشد. از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلو نیوتن برای اعمال بار شبه استاتیکی استفاده می گردد. بار جانبی بصورت افزایشی و در گام های متوالی به سازه وارد می شود تا جایی که سازه دچار ناپایداری گردد، یا اینکه تغییر مکان قاب به تغییر مکان مجاز محاسبه شده رسد. پس از گذشت چند سیکل بارگذاری در چرخه های بار-جابجایی، اولین نشانه های تسلیم بر روی المان زانویی که نقش میراگر تسلیم شونده را دارد، ظاهر می شود. پس از آن، افزایش بارگذاری برای شکست اعمال می شود. بارگذاری از تغییر مکان کم تا تسلیم عضو ادامه می یابد. یک دستگاه دیتالاگر چند کاناله، وظیفه قرائت و ثبت بار، جابجایی ها و کرنش ها به صورت دیجیتال را دارد. در



مهاربندهای دروازه‌ای با ورق‌های اتصال تکی چرخش‌های پلاستیک قابل ملاحظه‌ای به وجود می‌آید، در راستای کنترل این مسئله در این مطالعه با استفاده از دو ورق اتصال در گره مرکزی، کمانش خارج از صفحه مهاربند مطابق شکل شماره ۱۰ کنترل می‌گردد.

شکل شماره ۶: نمونه پیشنهادی شماره ۱



شکل شماره ۷: نمونه پیشنهادی شماره ۲



شکل شماره ۸: نمونه پیشنهادی شماره ۳



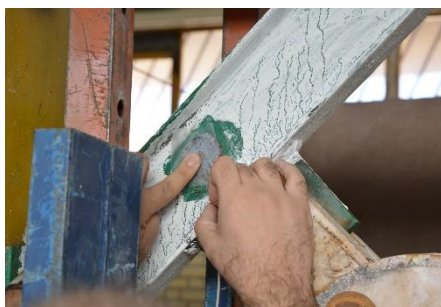
شکل شماره ۹: اتصال لولایی پای ستون



شکل شماره ۱۰: اتصال لولایی و ورق همگرایی



شکل شماره ۱۱: نصب کرنش‌سنج‌ها و جابجایی سنج‌ها



#### ۴- بررسی و ارزیابی عملکرد در مدلسازی المان محدود

به منظور ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی با مهاربندهای رایج، مهاربند قطری در قالب مدل پارامتری در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس ۲۰۱۲ [۳۷] شبیه‌سازی گردید تا بتوان نتایج و عملکرد روش پیشنهادی را با دقت بیشتر مقایسه و سنجید. برای مدلسازی از المان پوسته ایزوپرمتریک و یک المان چهارگره‌ای یا چهار نقطه‌ای با انحنای دوطرفه با انتگرال‌گیری کاهش یافته برای مش‌بندی و ایجاد شبکه اجزای محدود استفاده شده است. المان دارای سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی چرخشی در هر گره است و می‌تواند برای شبیه‌سازی پدیده کمانش کلی و موضعی استفاده گردد. از تحلیل استاتیکی غیرخطی برای تحلیل مدل‌ها، تجزیه و تحلیل غیرخطی سیستم تحت بارگذاری چرخه‌ای استفاده شده است. شرایط بارگذاری و مرزی مطابق با مشخصه‌های مطالعه آزمایشگاهی انجام شده است. در این مدل-سازی شرایط و اندازه‌های قاب دقیقاً مشابه قاب آزمایش شده می‌باشد. عرض قاب ۲ متر و ارتفاع آن نیز ۲ متر مقرر و یک مهاربند قطری نیز در این قاب توسط دو ورق اتصال پیش‌بینی گردیده است.

#### ۵- نتایج

۵-۱- مشاهدات آزمایشات تجربی: اولین آثار تسلیم عضو و استهلاک انرژی در المان زانویی مشاهده گردید. در شکل‌های شماره ۱۲، ۱۳ و ۱۴ تغییر شکل لینک زانویی برای نمونه‌های شماره ۲، ۱ و ۳ در انتهای سیکل شماره ۲۴ بارگذاری، نشان داده شده است. در شکل شماره ۱۵ نحوه جاری شدن همه المان‌های زانویی مشاهده می‌شود. در تمام نمونه‌ها مفاصل پلاستیک در محل‌های زانویی‌ها تشکیل گردید، اما در محل‌های مهاربندها و المان‌های تیر و ستون آثار تسلیم مشاهده نشد. همانطور که مشاهده می‌گردد، لهیدگی بال و جان، کمانش موضعی در جان و بال المان زانویی ایجاد می‌گردد. کمانش جانبی-پیششی محدودی نیز برای المان زانویی مشاهده می‌شود. علت

این تغییر شکل در زانویی را می‌توان به سبب نیاز کرنش پلاستیک بالا در این ناحیه دانست. با توجه به تغییر محل همگرایی مهاربندها و به تبع آن تغییر در هندسه قاب‌ها، بیشترین آثار تسلیم و تغییر شکل در المان زانویی، ابتدا در نمونه شماره ۳ و سپس نمونه شماره ۲ و کمترین مقدار در نمونه شماره ۱ مشاهده شد. شواهد نشان می‌دهد قاب پیشنهادی بسیار خوب توانسته نیروهای جانبی را کنترل و میرا نماید. در حالت متداول مهاربندهای دروازه‌ای، اتصال مرکز این نوع مهاربند شامل یک ورق اتصال در میان دو پروفیل می‌باشد که همین مسئله باعث کاهش شدید شعاع ژیراسیون در مقطع ورق اتصال نسبت به مقطع اعضای مهاربندی مجاور است که در برابر کمانش خارج از صفحه قاب بسیار ضعیف عمل می‌کند و در عمل به علت ضعف خمشی ورق اتصال در هنگام کمانش خارج از صفحه، اعضای مهاربندی در جذب انرژی وارد شده به سازه، نمی‌تواند به طوری کامل مشارکت داشته باشد. لذا در این تحقیق به دلیل استفاده از دو ورق اتصال در مرکز گره همگرایی مهاربندها، هیچگونه کمانش خاصی در مهاربندها تا انتهای آزمایش مشاهده نشد. همچنین برای هیچ کدام از نمونه‌ها، خرابی ترد در محل اتصال نیز ایجاد نگردید.



شکل ۱۳: تغییر شکل زانویی در نمونه شماره دو



شکل ۱۲: تغییر شکل زانویی در نمونه شماره یک

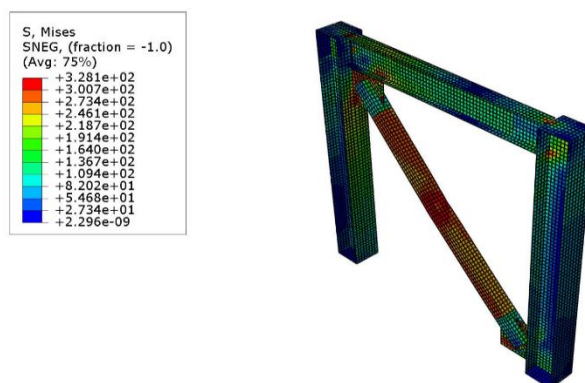


شکل ۱۵: جاری شدن جان و بال زانویی در نمونه های شماره ۱، ۲ و ۳



شکل ۱۴: تغییر شکل المان زانویی در نمونه شماره سه

۵-۲- مشاهدات مدل المان محدود: قاب تحت پروتکل بارگذاری چرخه‌ای ATC-24 مطابق شکل شماره ۵ تحلیل شده است. در شکل شماره ۱۶ کانتورهای تنش نمونه مورد مطالعه نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد بعد از ورود نیرو طی چند سیکل رفت و برگشت بارگذاری، اولین مفصل پلاستیک در مهاربند تشکیل شده و نهایتاً مهاربند تسلیم و کمانش می‌نماید و از حیض انتفاع خارج می‌گردد، به طوری که پس از کمانش به دلیل عدم همگرایی گره‌ها در نرم افزار، ادامه تحلیل در نرم افزار صورت نمی‌پذیرد و فرایند بارگذاری علیرغم ۲۴ سیکل اعمالی، در ۱۹ سیکل خاتمه می‌یابد.



شکل ۱۶: کانتور تنش مدل المان محدود مهاربند قطری

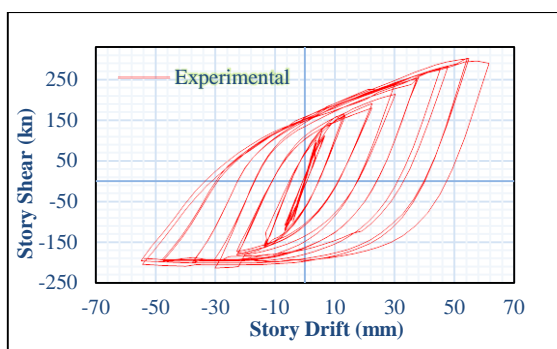
۳-۵- بررسی نتایج آزمایش تجربی و المان محدود: مقاومت و سختی، جزء مشخصات اساسی یک سازه تحت بارهای لرزه‌ای به شمار می‌آیند. در تعیین این پارامترها، مقدار سختی قاب‌ها براساس سختی سکانتی آنها محاسبه می‌شود. مقدار مقاومت تسلیم محاسبه شده برای نمونه‌ها با توجه به توصیه‌های FEMA356 تعیین شد. در سازه‌ها، ظرفیت تغییرشکل غیرارتجاعی و به عبارتی قابلیت سازه در تحمل تغییرشکل‌های غیرالاستیک بدون اینکه سازه دچار فروریزش شود به کمک ضریب شکل‌پذیری بیان می‌گردد، بدین ترتیب ضریب- رفتار سازه مستقیماً با ضریب شکل‌پذیری آن رابطه دارد. هرچه ظرفیت شکل‌پذیری سازه  $\mu$  بیشتر باشد، میزان جذب انرژی بالاتر بوده و در نتیجه مقدار ضریب رفتار بزرگتر خواهد بود. در این روش شکل‌پذیری با استفاده از مفاد دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰) و رابطه شماره ۷ به دست می‌آید. مدل غیرخطی سازه با یک مدل رفتار دوخطی ساده جایگزین گردیده و از مقادیر بدست آمده برای بدست آوردن نیروی تسلیم و جابجایی نظیر آن، استفاده می‌شود.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (7)$$

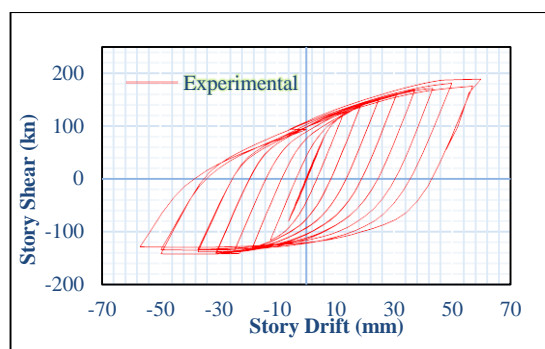
$\Delta_u$ : تغییرشکل نسبی سازه، پس از ورود به ناحیه پلاستیک  
 $\Delta_y$ : تغییرشکل نسبی سازه در تراز مقاومت تسلیم سازه

در سیستم‌های اتلافگر انرژی بر مبنای رفتار هیستریزس مواد، انرژی تلف‌شده عبارت است از سطح محصور بین حلقه‌های ایجاد شده در نمودار که مبنای اتلاف انرژی در این سیستم‌ها رفتار غیرخطی مصالح تشکیل‌دهنده آنها است که به این رفتار، هیستریزس مواد گفته می‌شود [۳۸]. در شکل‌های شماره ۱۷، ۱۸ و ۱۹ منحنی پاسخ چرخه‌ای (هیستریزس) قاب‌های شماره یک، دو، سه مدل‌های آزمایش شده و در شکل شماره ۲۰ منحنی هیستریزس مدل المان محدود مهاربند قطری نشان داده شده است، همچنین در شکل شماره ۲۱ به صورت همزمان منحنی‌های چرخه ای هیستریزس کلیه مهاربندها در سیکل آخر نشان شده است. در صورتی که با رسیدن به ناحیه پلاستیک باربرداری صورت گیرد، تنها بخشی از کرنش برگشت‌پذیر بوده و بخشی از تغییرشکل به وجود آمده، ماندگار می‌باشد و از بین نخواهد رفت. با توجه به این اشکال، سازه بعد از حرکت قاب و ورود نیرو به عضو زانویی پس از چند سیکل رفت و برگشت تسلیم و پس از آن در فاز غیرارتجاعی قرار می‌گیرد. این حالت در همه نمونه‌ها قابل مشاهده است. اتلاف انرژی، از نمودار نیرو-جابجایی به خوبی دیده می‌شود. هرچه تقارن منحنی تحت بارهای کششی و فشاری بیشتر باشد، نشان‌دهنده یکنواختی رفتار عضو تحت بارگذاری‌های متناوب می‌باشد، که در این طرح رفتار در حالت فشاری و کششی متفاوت بودند و در حالت فشاری از جذب انرژی کمتری برخوردار شدند. همین موضوع در مهاربند قطری نیز صادق می‌باشد و در فشار توانایی کمتری در جذب انرژی دارد به طوری که در سیکل بارگذاری شماره ۱۹ مهاربند دچار کماتس می‌گردد و دیگر تاب تحمل نیرو ندارد. تعداد سیکل‌هایی که یک المان می‌تواند تا قبل از گسیختگی تحمل نماید، نشان‌دهنده قابلیت اطمینان و پایداری عضو می‌باشد، که در این طرح با توجه به تعداد بالای سیکل‌های تحمل شده قاب پیشنهادی از قابلیت اطمینان و پایداری مطلوبتری به نسبت قاب مهاربند قطری برخوردار است. همچنین در این نمودارها، المان زانویی در سیکل‌های آخر بارگذاری، دچار کاهش سختی و همچنین زوال مقاومت شده است، که به دلیل جاری شدن لینک زانویی در مهاربند پیشنهادی می‌باشد. سطح زیر نمودار نشان‌دهنده انرژی مستهلک شده توسط اعضا است. هرچه این سطح بزرگ‌تر باشد نشان‌دهنده این است که عضو شکل‌پذیرتر بوده

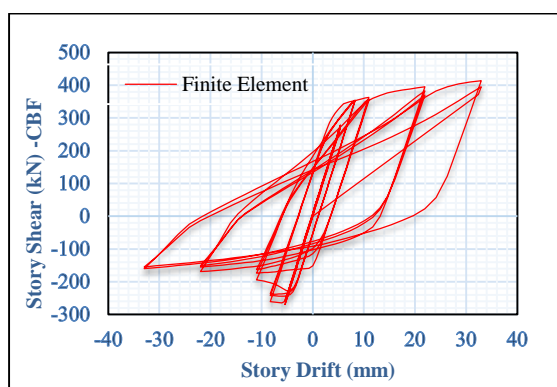
و قابلیت جذب انرژی بیشتری دارد. با افزایش جابجایی قاب، منحنی نیرو-جابجایی چاق تر شده که بیانگر انرژی تلف شده بیشتر می باشد. با توجه به اشکال زیر، سطح زیر منحنی چرخه‌ای (هیسترزیس) قاب‌های پیشنهادی بیشتر از سطح زیر منحنی چرخه‌ای مهاربند قطری می باشد. مساحت زیر نمودار در نمونه‌های پیشنهادی این تحقیق به ترتیب بیشتر به کمتر در قاب‌های شماره ۳، ۲ و ۱ است. سطح زیر نمودار مهاربند قطری به دلیل تعداد سیکل بارگذاری قابل تحمل پایین تر، بسیار کمتر از نمونه‌های پیشنهادی گردید. نیروی قابل تحمل در مهاربند قطری به دلیل سختی بسیار بالای آن از نمونه‌های پیشنهادی بیشتر بود به طوری که تا ۴۰۵ کیلو نیوتن توانست نیرو تحمل نماید که این تحمل نیرو در مهاربند قطری نمونه شماره ۳ که بیشترین تحمل نیرو در بین این سه نمونه آزمایشی را دارد، ۳۴۵ کیلو نیوتن است که تقریباً مدل پیشنهادی در حدود ۱۵ درصد تحمل نیروی کمتری به نسبت مهاربند قطری را دارد. تغییر مکان سازه و دریافت قابل تحمل در مهاربند قطری ۳۳ میلیمتر و در مهاربند پیشنهادی ۶۷ میلیمتر می باشد، که در حدود ۲ برابر دریافت سازه پیشنهادی بیشتر از مهاربند قطری می باشد که یکی از سخت ترین قاب‌های مهاربندی است.



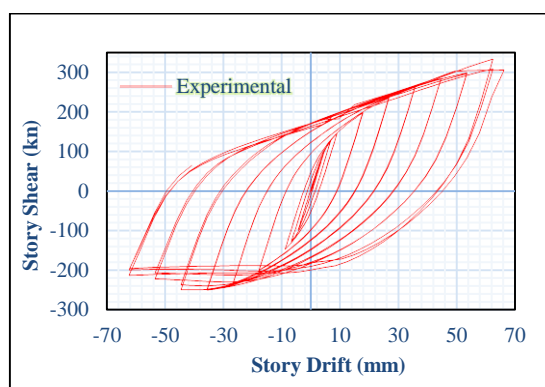
شکل ۱۸: منحنی چرخه ای نمونه شماره ۲



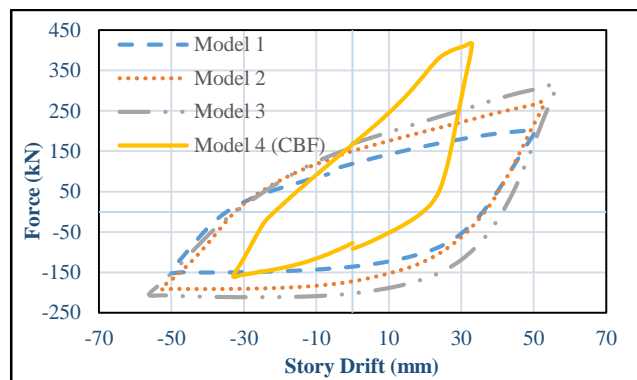
شکل ۱۷: منحنی چرخه ای نمونه شماره ۱



شکل ۲۰: منحنی چرخه ای مهاربند قطری



شکل ۱۹: منحنی چرخه ای نمونه شماره ۳

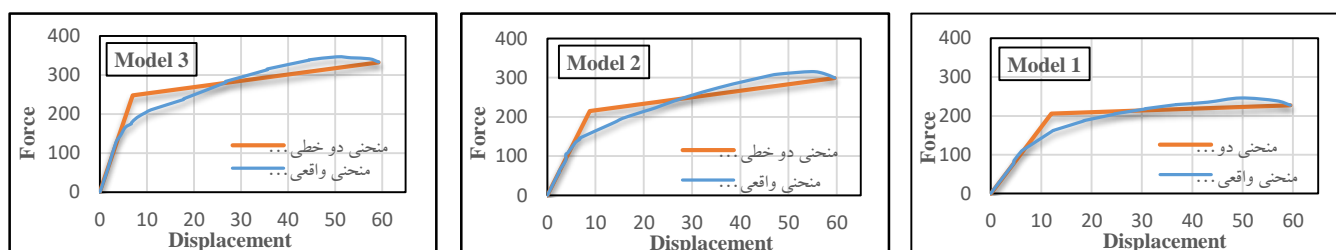


شکل ۲۱: منحنی چرخه ای کلیه مهاربندها طی سیکل آخر بارگذاری

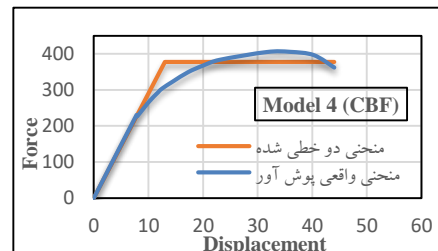


سطوح زیر منحنی هیستریزیس نشان می‌دهند که تاب‌آوری و شکل‌پذیری در مهاربند پیشنهادی به دلیل تعداد بیشتر سیکل‌های بارگذاری قابل تحمل و چاق‌تر بودن سطوح زیر نمودار، بیشتر از مهاربند قطری است.

با توجه به موارد فوق، تغییر مکان‌های غیرخطی تحت آنالیز (Pushover) را، به صورت دوخطی مطابق شکل شماره ۲۲ ساده نموده و ضریب شکل‌پذیری بدست آورده شد. در جدول شماره ۴ مقادیر سختی، مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی و ضریب شکل‌پذیری برای سه نمونه مورد آزمایش و یک نمونه تحلیلی نشان داده شده است. محاسبات نشان می‌دهد سختی در نمونه شماره دو ۴۲٪ بیشتر از نمونه شماره یک و سختی نمونه شماره سه ۱۸٪ بیشتر از نمونه شماره دو و نمونه قطری ۷۲٪ بیشتر از نمونه شماره سه می‌باشد. مقاومت تسلیم نمونه شماره دو ۳۷٪ بیشتر از نمونه شماره یک و نمونه شماره سه ۱۰٪ بیشتر از نمونه شماره دو و مقاومت تسلیم نمونه قطری ۴۱٪ بیشتر از نمونه شماره سه است. مقاومت نهایی نمونه شماره دو ۳۵٪ بیشتر از نمونه شماره یک و نمونه شماره سه ۸٪ بیشتر از نمونه شماره دو و نمونه قطری ۱۷٪ بیشتر از نمونه شماره سه می‌باشد. شکل‌پذیری نمونه شماره دو ۳۸٪ بیشتر از نمونه شماره یک و شکل‌پذیری نمونه شماره سه ۱۸٪ بیشتر از نمونه شماره دو و نمونه قطری ۶۸٪ کمتر از نمونه شماره یک است. بنابراین ظرفیت تغییر شکل غیرارتجاعی و به عبارتی قابلیت سازه در تحمل تغییر شکل‌های غیرالاستیک، به ترتیب در سازه‌های شماره سه، دو، یک و قطری می‌باشد، و میزان جذب انرژی از بیشتر به کمتر به ترتیب در قاب شماره سه، دو، یک و قطری می‌باشد.

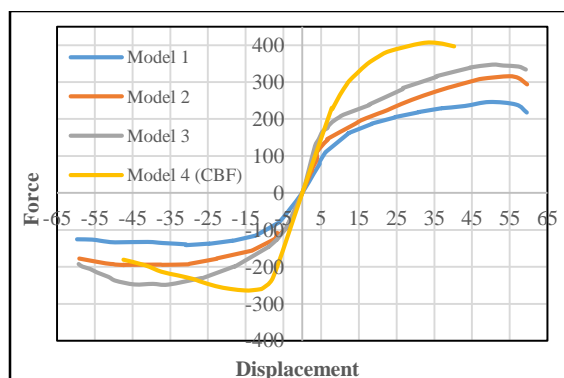


| نمونه   | شکل‌پذیری (Fu) |      |     | مقاومت نهایی (KN) | مقاومت تسلیم (KN) | سختی (K) |
|---------|----------------|------|-----|-------------------|-------------------|----------|
|         | μ=Δu/Δy        | KN/M | KN  |                   |                   |          |
| Model 1 | 4.85           | 1715 | 96  | 237               | 96                | 1715     |
| Model 2 | 6.95           | 2444 | 134 | 321               | 134               | 2444     |
| Model 3 | 8.19           | 2884 | 164 | 345               | 164               | 2884     |
| Model 3 | 3.32           | 4988 | 232 | 405               | 232               | 4988     |



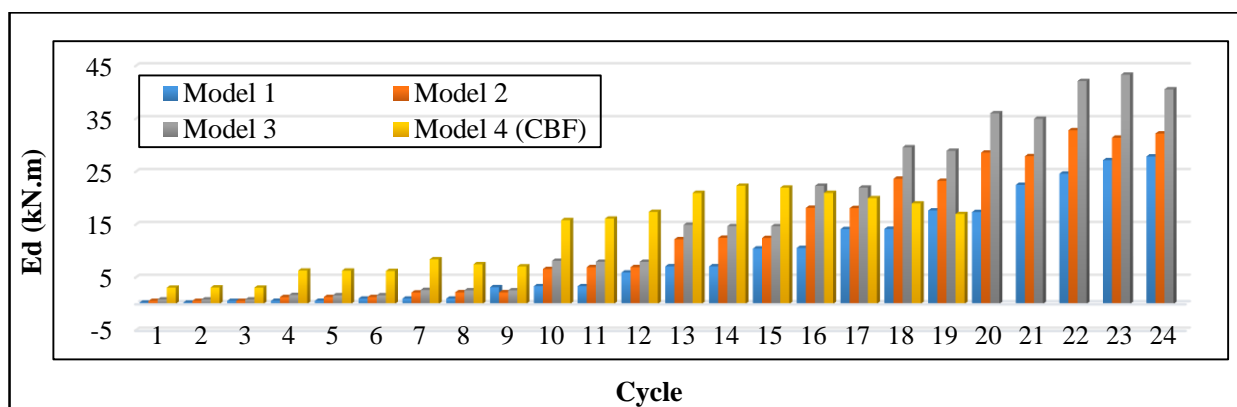
شکل ۲۲: دیاگرام شماییک نیرو-جابجایی دوخطی جدول شماره ۴: جزئیات مربوط به سختی، مقاومت تسلیم و شکل‌پذیری نمونه‌های تجربی

در شکل شماره ۲۳ نمودار پوش‌آور هر سه نمونه آزمایش شده و نمونه تحلیلی قطری نشان داده شده است:

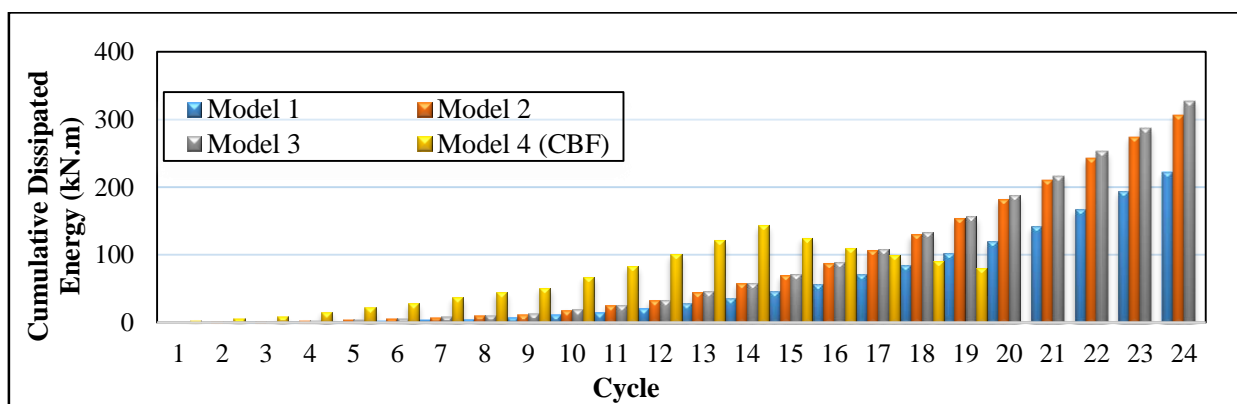


شکل ۲۳: نمودار پوش‌آور مدل‌های آزمایشی و تحلیلی

۴-۵- انرژی تلف‌شده در نمونه‌های مورد مطالعه تجربی: مقدار انرژی تلف‌شده و انرژی تجمعی تلف‌شده قاب‌های مورد مطالعه که حاصل جمع مساحت زیر نمودارهای نیرو-جابجایی قاب‌ها می‌باشد، در نمودارهای زیر به دست آمده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. میزان انرژی تلف‌شده در طی بارگذاری بر روی فولاد، را می‌توان مستقل از نرخ کرنش در نظر گرفت. در شکل شماره ۲۴ انرژی تلف‌شده و در شکل شماره ۲۵ انرژی تلف‌شده تجمعی برای نمونه‌های آزمایشی و تحلیلی در هر سیکل نشان داده شده است. همانطور که در نمودارها دیده می‌شود، به دلیل کمانش مهاربند قطری در نمونه تحلیلی، این قاب مهاربندی تا سیکل شماره ۱۹ توانایی تحمل بار را دارد و نتایج پس از کمانش کامل در نمودار قابل مشاهده نیست. بر اساس نتایج به دست آمده انرژی تلف‌شده قاب مهاربند قطری به دلیل سختی بالای آن در ابتدای بارگذاری و در سیکل شماره یک ۳٫۵ برابر نمونه شماره سه می‌باشد و این تناسب در سیکل شماره ۱۵ به ۱٫۵ برابر می‌رسد و در سیکل ۱۶ مقدار به ۰٫۹۳٪ نمونه شماره سه رسیده است که نشان از کاهش شدن مقدار انرژی تلف‌شده، تسلیم و کمانش مهاربند را دارد. انرژی تلف‌شده در سیکل شماره ۱۹ به ۰٫۶۵٪ می‌رسد تا در سیکل شماره ۱۹ مهاربند کاملاً کمانش و از حیض ارتفاع خارج می‌گردد. میزان انرژی تلف‌شده تجمعی نیز در در ابتدای بارگذاری در مهاربند قطری ۳٫۶ برابر نمونه شماره سه می‌باشد و این روند در سیکل شماره ۱۷ به ۰٫۹۲٪ نمونه شماره سه رسیده تا در سیکل شماره ۱۹ مقدار انرژی تلف‌شده تجمعی نمونه قطری به ۰٫۵۱٪ نمونه شماره سه می‌رسد که این موضوع هم به دلیل رفتار کمانشی مهاربند قطری رخ می‌دهد. در مقایسه مدل‌های پیشنهادی با یکدیگر در سیکل آخر بارگذاری، انرژی تلف‌شده نمونه شماره سه ۰٫۲۶٪ بیشتر از نمونه شماره دو و نمونه شماره دو ۰٫۱۶٪ بیشتر از نمونه شماره یک می‌باشد، همچنین میزان انرژی تلف‌شده تجمعی در چرخه آخر، در نمونه شماره سه ۷٪ بیشتر از نمونه شماره دو و نمونه شماره دو ۰٫۲۷٪ بیشتر از نمونه شماره یک می‌باشد که این موارد از مقایسه سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی آنها نیز مشخص است.



شکل ۲۴: انرژی تلف‌شده در هر سیکل



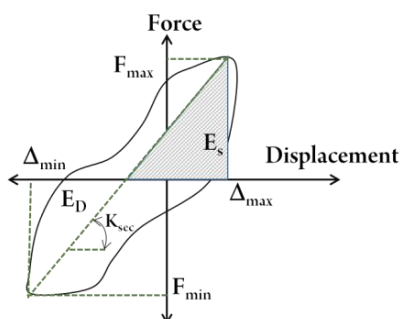
شکل ۲۵: انرژی تلف‌شده تجمعی نمونه‌ها

با مقایسه مقادیر فوق مشخص می‌گردد که مهاربند قطری در تحمل نیروهای جانبی شاید در ابتدا جذب نیروی بیشتری داشته باشد، ولی به تناسب هرچه بارگذاری پیش می‌رود مدل پیشنهادی این پژوهش است که خود را در مقابل جذب نیرو به مهاربند قطری رسانده و حتی می‌تواند در سیکل‌های بیشتر بارگذاری نیروهای جانبی را تحمل نموده و در واقع مدت زمان بیشتری در مقابل نیروهای جانبی تحمل نیروها را نماید. همچنین در سیستم مهاربند دروازه‌ای با ترکیب المان زانویی (KCBF) هرچه گره اتصال مهاربند به سمت مرکز قاب تمایل پیدا کند علاوه بر افزایش در سختی جانبی منجر به افزایش مقاومت جانبی، کاهش تغییر مکان هدف و افزایش شکل پذیری و نیز افزایش میزان انرژی های تلف شده نیز می‌گردد. میزان انرژی تلف شده در این قاب، یکی از برتری‌های این سیستم پیشنهادی نسبت به سایر سیستم‌های معادل می‌باشد.

#### ۵-۵- سختی سکانتی در نمونه‌های مورد مطالعه تجربی: سختی سکانتی یک سازه، جهت کنترل جابجایی‌های آن در حوزه فر-

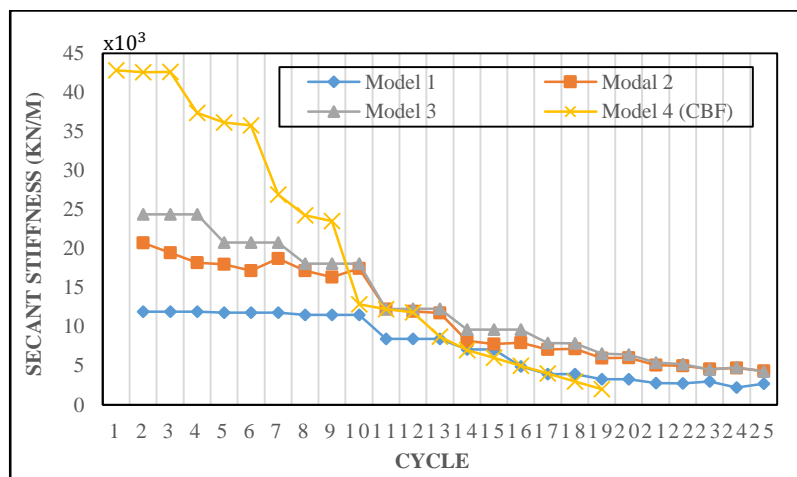
ارتجاعی یکی از پارامترهای مهم به حساب می‌آید که از رابطه شماره ۸ و با استفاده از نمودار شکل شماره ۲۶ محاسبه می‌گردد:

$$E_S = \frac{1}{8} (F_{max} - F_{min}) \times (\Delta_{max} - \Delta_{min}) \quad (۸)$$



شکل ۲۶: نحوه تعیین سختی سکانتی

سختی سکانتی در نمونه‌های آزمایش شده، مطابق نمودار شکل شماره ۲۷ محاسبه شده است:



شکل ۲۷: سختی سکانتی نمونه‌های مورد مطالعه تجربی و تحلیلی

با توجه به شکل شماره ۲۷ در سیکل اول بارگذاری، نمونه شماره یک سختی سکانتی  $13,30 \text{ kN/m}$ ، نمونه شماره دو سختی سکانتی  $22,14 \text{ kN/m}$  و نمونه شماره سه سختی سکانتی  $24,75 \text{ kN/m}$  و نمونه تحلیلی شماره ۴ (مهاربند قطری) سختی سکانتی  $43,63 \text{ kN/m}$  را تجربه می‌کند که با افزایش جابجایی، سختی سکانتی کاهش یافته و سیر نزولی دارد. در ابتدای بارگذاری این مهاربند قطری است که به

تناسب مهاربند شماره سه پیشنهادی ۷۶٪ سختتر است ولی با گذشت مدت و حجم بارگذاری این تناسب کم و کمتر می شود تا در آغاز تسلیم مهاربند قطری در سیکل شماره ۱۰ به کمتر از نمونه پیشنهادی می رسد.

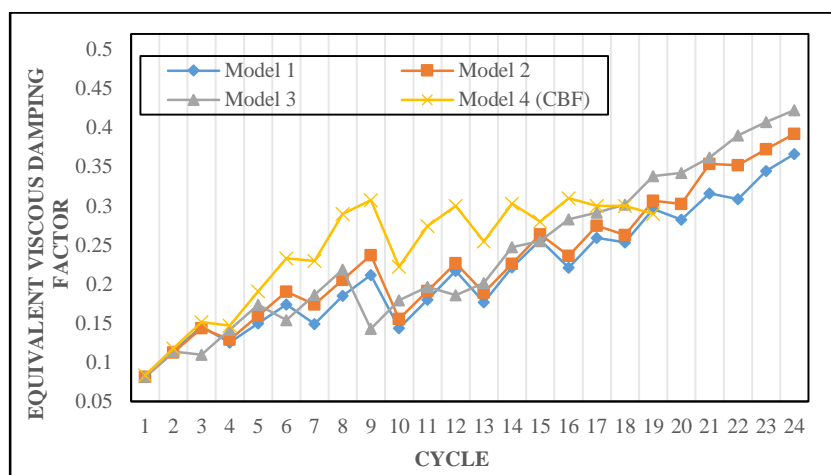
۷-۵- میرایی ویسکوز معادل در نمونه های مورد مطالعه تجربی: میرایی ویسکوز معادل، با استفاده از منحنی نیرو-جابجایی نمونه ها و از رابطه کلاسیک شماره ۹ به دست می آید و در شکل شماره ۲۸ نشان داده شده است.

$$\xi_{eq} = \xi_0 + \xi_{hyst} \quad (9)$$

در رابطه فوق  $\xi_0$  میرایی ابتدایی، مربوط به سیکل های ارتجاعی سازه و  $\xi_{hyst}$  نسبت میرایی ویسکوز معادل، به سبب رفتار غیرارتجاعی در چرخه های رفت و برگشتی می باشد. مقدار این کمیت از رابطه شماره ۱۰ تعیین می شود:

$$\xi_{hyst} = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{E_D}{E_S} \right) \quad (10)$$

در این رابطه،  $E_D$  سطح زیر هر یک از حلقه های منحنی چرخه ای و  $E_S$  انرژی کرنشی ذخیره شده می باشد.



شکل شماره ۲۸: نسبت میرایی ویسکوز برای نمونه های مورد مطالعه تجربی و تحلیلی

همانطور که در شکل شماره ۲۸ دیده می شود، میزان میرایی ویسکوز معادل برای نمونه های شماره ۱، ۲ و ۳ در چرخه های انتهایی به ترتیب برابر ۳۵٪، ۳۸٪ و ۴۰٪ محاسبه و در مهاربند قطری نیز به دلیل کماتش در سیکل شماره ۱۹، نمی تواند تا انتهای بارگذاری در نمودار قرار گیرد. میرایی ویسکوز معادل در قاب مهاربندی قطری در اوایل بارگذاری متناسب با روش پیشنهادی پیش می رود ولی در اواسط بارگذاری از پیشرفت خوبی برخوردار می شود. اما این مهاربند در سیکل ۱۸ افت کرده و کمتر از مدل های پیشنهادی می گردد. میرایی ویسکوز معادل در سیکل آخر بارگذاری در نمونه شماره سه، ۱۱ درصد بیشتر از نمونه شماره دو، و نمونه شماره دو، ۱۳ درصد بیشتر از نمونه شماره یک و میرایی ویسکوز معادل مهاربند قطری در سیکل شماره ۱۹ تقریباً برابر میرایی در نمونه شماره یک مدل پیشنهادی این پژوهش می باشد. این میرایی برای یک سازه یک طبقه و یک دهانه بدست آمده است.

## ۶- نتیجه گیری

- ۱- جزئیات استفاده شده در گره میانی این پژوهش تجربی نشان می دهد بر خلاف مطالعات قبلی کماتش در مهاربند رخ نمی دهد.
- ۲- با جابجایی گره میانی به سمت گوشه قاب و افزایش خروج از مرکزیت این نقطه، سختی قاب کمتر شده و در نتیجه دوره تناوب نیز افزایش می یابد. به طور کلی می توان گفت مدل شماره سه این پژوهش بیشترین مقدار مقاومت و شکل پذیری را داشته و انرژی استهلاکی آن نیز افزایش و بهینه ترین مدل می باشد.



- ۳- در مطالعه نمونه KCBF پیشنهادی با بررسی رفتار هیستریزس تغییر شکل-نیرو، نتایج نشان داد این سیستم دارای تعدیل نیروی بالایی خواهد بود. با توجه به نتایج به دست آمده، رفتار مناسب و کارکرد خوب سیستم پیشنهادی و تسلیم شدن همزمان آنها در همه نمونه‌ها، بیانگر عملکرد قابل قبول سیستم پیشنهادی شده است. تسلیم شدن زانویی‌ها در هر سه مدل باعث اتلاف و جذب انرژی شده و از افت ناگهانی مقاومت دراعضای سازه‌ای جلوگیری می‌کند که گامی مثبت در ارتقای رفتار این نوع مهاربندها است. منحنی‌های هیستریزس پایدار و بدون افت چشمگیر سیستم پیشنهادی نشانگر جذب انرژی بالای آنها است.
- ۴- استفاده از سیستم پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک روش آسان، کارا و مقرون به صرفه جهت مقاوم‌سازی سازه‌های موجود استفاده گردد. تعویض و اصلاح المان تسلیم‌شده پیشنهادی در سازه‌هایی که با این سیستم اجرا شوند، پس از یک زلزله نسبتاً شدید در مقایسه با سایر سیستم‌های مهاربندی مرسوم، آسانتر می‌باشد.
- ۵- سیستم مهاربند قطری تا  $405 \text{ kN/m}$  و سیستم KCBF پیشنهادی تا  $345 \text{ kN/m}$  نیرو جذب می‌نماید. اما فرایند جذب نیرو در سیستم قطری در ۱۹ سیکل و در سیستم پیشنهادی در ۲۴ سیکل ادامه می‌یابد که نشان از تاب‌آوری بیشتر سیستم پیشنهادی در مدت زمان بیشتر بارگذاری است.
- ۶- بیشترین مقدار ضریب شکل‌پذیری در نمونه شماره ۳ در روش KCBF تأمین می‌گردد و کمترین مقدار ضریب شکل‌پذیری نیز مربوط به نمونه مهاربند قطری خواهد بود.
- ۷- انرژی جذب شده در سیستم مهاربند قطری به تناسب دیگر نمونه‌های تجربی تا سیکل شماره ۱۵ برتر پیش می‌رود، ولی از سیکل شماره ۱۶ که مهاربند شروع به تسلیم و کمانش می‌نماید روند جذب انرژی کاهش یافته به طوری که در سیکل ۱۹ قاب قطری انرژی تلف شده به ۶۵٪ و انرژی تلف شده تجمعی نیز به ۵۱٪ سیستم پیشنهادی می‌رسد و قاب قطری تاب تحمل نیرو ندارد ولی سیستم پیشنهادی همچنان در حال جذب و اتلاف انرژی می‌باشد.
- ۸- سختی سکانتی مهاربند قطری در ابتدای بارگذاری به تناسب مهاربند شماره سه پیشنهادی ۷۶٪ سختتر است ولی با افزایش سیکل‌های بارگذاری این تناسب کم و کمتر می‌شود تا در آغاز تسلیم مهاربند قطری در سیکل شماره ۱۰ به کمتر از نمونه پیشنهادی می‌رسد.

## مراجع

- [۱]- Aristizabal-Ochoa, J. D. (1986). "Disposable Knee Bracing: Improvement in Design of Steel Frames" Journal of Structural Engineering, ASCE, 112(7), 1544-1552
- [۲]- Balendra, T., Sam, M.T., Liaw, C.Y., and Lee, S.L., "Preliminary Studies into The Behaviour of Knee Braced Frames Subject to Seismic Loading," Engineering Struct, Vol. 13, PP. 68-74, 1991
- [۳]- Zahraei, SM., Jalali, M. "Analytical study of seismic behavior of rehabilitated knee frames," Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE), third year Winter 2008
- [۴] Rashidi, A.H., Rasidi, A. "Investigation of geometric characteristics of knee braces and introduction of the best dimensions Geometric of this system." 3rd. International Conference on Researches in Science & Engineering 13 Aug (2017)., Kasem Bundit University, Bangkok, Thailand
- [۵] Bayati, N., Rezaei, F. "Evaluation of the pattern of elbow braces on the response of steel structures." Fourth National Conference in recent years in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning, Tehran - October 2017
- [۶] Hejazi, M., Memarzadeh, P., Mohamadian, A. "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, 2-4 May 2012
- [۷] Alirezaei, M., Hoseini Hashemi, B. "Experimental Investigation of a Combined System in Steel Braced Frames." JSEE Vol. 17, No. 3, 2015

- [۸] Alirezaei, M., HoseiniHashemi, B. "Eccentrically Knee Bracing: Improvement in Seismic Design and Behavior of Steel Frames." JSEE Vol. 18, No. 3, 2016
- [۹] Alirezaei, M., HoseiniHashemi, B. "On the Evaluation of the Use of EKBs to Improve Seismic Performance of Steel Frames." International Journal of Steel Structures 18(1): 25-37 (2018)
- [۱۰] Ghafouri-Nejad, A., Alirezaei, M., Mirhoseini, S.M., Zeighami, E., "Parametric study on seismic response of the knee braced frame with friction damper." Structures 32 (2021) 2073–2087
- [۱۱] Honma, S., Ebato, K., Harada, Y. "Ductile steel knee brace with built-in comb-shaped seismic damper." Journal of Constructional Steel Research 184 (2021) 106765
- [۱۲] Mahmoudi, M., Montazeri, M., Jalili Sadr, A. "Seismic performance of steel X-knee-braced frames equipped with shape memory alloy bars." Journal of Constructional Steel Research 147 (2018) 171–186
- [۱۳] Junda, E., Leelataviwat, S., Doung, P. "Cyclic testing and performance evaluation of buckling-restrained knee-braced frames." Journal of Constructional Steel Research 148 (2018) 154–164
- [۱۴] Leelataviwat, S., Suksan, B., Srechai, J., Warnitchai, P. "Seismic Design and Behavior of Ductile Knee-Braced Moment Frames." Journal of Structural Engineering © ASCE / MAY 2011
- [۱۵] Asghari, A., Saharkhizan, S. "Investigation of cyclic behavior and evaluation of frame performance with elbow connection using finite element analysis." Sharif Civil Engineering Journal Volume 12, No. 3, Spring 2016
- [۱۶] Haghayegh, Askari Marnani, J., RouhaniManesh, M. "Investigation of seismic behavior of knee brace in comparison with brace Cross and Chevron in steel structures." Analysis of Structure and Earthquake. Volume ۲-۳۴, No. ۱/۲, autumn 2015
- [۱۷] Mahmoudi Sahebi, M., Montazeri, M. "Seismic performance evaluation of knee braces equipped with shaped memory alloys." Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE) . Volume 3, No. 2, Summer 2016
- [۱۸] Silva A, Macedo L, Monteiro R, Castro J. Earthquake-induced loss assessment of steel buildings designed to Eurocode 8. Eng Struct 2020;208:1–15
- [۱۹] Bastami M, Ahmady RJ, Mohamadi A. Study of the seismic performance of Centrally Fused Braced Frame (CFBF). Thin-Walled Struct 2019;145:1–20.
- [۲۰] Bastami M, Ahmady RJ. Development of Eccentrically Interconnected Braced Frame (EIC-BF) for seismic regions. Thin-Walled Structures 2018;131:451–63.
- [۲۱] Bastami M, Ahmady RJ. Development of centrally fused braced frame (CFBF) for seismic regions. Soil Dyn Earthquake Eng 2019;127:1–12.
- [۲۲]- Balendra, T, Sam, M.T, & Liaw, C.Y. "Diagonal ]0[ Brace with Ductile knee Anchor for a seismic steel frame" Earthquake Engineering & structuralDynamics; 1990; 19:847-858.
- [۲۳]-Zahraei, S.M. (2009) Behavior of vertical shear beams in steel buildings ", Publications of the Building and Housing Research Center.
- [۲۴]-Zahraei, S.M., Jalali, M. (2007) "Analytical study of seismic behavior of elbow braced frames", Journal of Structures and Steel, Iranian Association of Steel Structures, the third year of winter 86
- [۲۵] Feng W, Su M, Min H, Yirong G, Shaohua L. Cyclic behaviour of Y-shaped eccentrically braced frames fabricated with high-strength steel composite. J Constr Steel Res 2016;120:176–87.
- [۲۶] Lian M, Mingzhou S. Experimental performance of Y-shaped eccentrically braced frames fabricated with high strength steel. Journal of Steel and Composite Structures 2017;24(4):441–53
- [۲۷]- Zamani S.M., Vafai A., Aghakouchak A.A. and Desai, Ch., "Experimental Investigation of Steel Frames Braced with Symmetrical Pairs of yshaped Concentric Bracings", International Journal of Steel Structures, 11(2), 2011, 117–131.
- [۲۸]- Zamani S.M., Vafai A., Aghakouchak A.A. and Kazemi, M.T., Experimental investigation of steel frames with single bays of symmetrical yshaped concentric bracings, Scientia Iranica, 19 (2), 2012, 195–210.
- [۲۹] Manolache L, Serban O, Tirca L, Nastroi E, Montuori R, Piluso V. Self-centering demand assessment of friction sliding braced frame buildings. 11th National Conference on Earthquake Engineering 2018. 2018.

- [۳۰] -Kazemi, MT, Erfani, S., "Design of gate braces for earthquakes," Proceedings of the Third National Conference on Critique of the Design of Buildings against Earthquake (Standard 2800) pp. 433-435, 2002
- [۳۱] Keivan,A., Zhang,Y. "Nonlinear seismic performance of Y-type self-centering steel eccentrically braced frame buildings." Engineering Structures 179 (2019) 448–459
- [۳۲] Xiao,X., Zhang,P., Zhang,Q. "Seismic Energy Dissipation Analysis Of Y And K Type Composite Eccentrically Braced Steel Frames." 2nd International Workshop on Renewable Energy and Development (IWRED 2018)
- [۳۳] Shahiditabar A, Moharrami H. "Development and experimental verification of self-centered y-shaped braced frame". Structures, Elsevier, 34 (2021), 1312-1325
- [۳۴] Ramin,K. "Seismic Behavior of Steel Off-Diagonal Bracing System (ODBS) Utilized in Reinforced Concrete Frame." Hindawi Publishing Corporation Journal of Structures Volume (2014), Article ID 403916, 20 pages
- [۳۵] Li, Zh., Luo, J., Tao, D., Liang, F ., He, G. "Seismic performance of multi-story glulam post-and-beam structures reinforced with knee-braces." Journal of Building Engineering 44 (2021) 102887
- [۳۶] ATC-24. Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures. California.
- [۳۷] ABAQUS-6.12-1. (2012). standard user's manual. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc
- [۳۸]-Tajmalian, H., "Parametric study of seismic behavior of frames of a metal braced floor equipped with flow damping elements", Master Thesis, Sharif University of Technology; 2007