

Numerical analysis of new self-centering brace with arc plate for improving the seismic performance

Mahdi Malek Mohammad Pour¹, Soheil Monajemi Nejad^{2*}, AbdolReza Sarvgad Moghadam³

1- PhD candidate of earthquake engineering, Civil engineering faculty, Islamic Azad University Central Tehran Branche, Tehran, Iran

2-Assistant professor of earthquake engineering, Civil engineering faculty, Islamic Azad University central Tehran Branche, Tehran-Iran

3-Associated professor of structural engineering, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran-Iran

ABSTRACT

Self-centering braces are the structural systems which cause to reduce the drift of structures after earthquakes. In this paper, a new self-centering brace is proposed to improve the seismic behavior of the structures. Also, it can be reduced the permanent of deflection in the structures after earthquake. The advantages of this brace are the facility of construction compatible with the construction possibility in Iran, low cost, high capacity of axial force, high energy dissipation, development capability and use in the structures. For this purpose, the components of proposed brace have been presented and the behavior of brace has been extracted using numerical modeling. Also, results demonstrated the arched steel pales has the high influence in the damping of proposed brace systems. In addition, the parametric studies have been studied and the effects of these parameters in the behavior of the proposed brace were investigated. Parameters which considered includes thickness, curvature radius, arched spring width. Also, the results of the analysis show that with the increase in the thickness of the steel plate, the energy consumption capacity increases significantly. At the same time, the results show that when the thickness of the steel plate increases, the elastic deformation ability increases and entering the plastic area is difficult.

ARTICLE INFO

Receive Date: 15 December 2023

Revise Date: 14 June 2024

Accept Date: 24 July 2024

Keywords:

self-centering brace
finite element simulation arc-plates
cyclic analysis
damping,
flag hysteresis behaviour

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.422590.3256](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.422590.3256)

*Corresponding author: Soheil Monajemi Nejad
Email address: soh.monajeminejad@iauctb.ac.ir

تحلیل عددی و آزمایشگاهی مهاربند جدید مرکزگرا با صفحات قوسی برای بهبود عملکرد لرزه‌ای

مهدی ملک محمدپور^۱، سهیل منجمی نژاد^{۲*}، عبدالرضا سروقد مقدم^۳

۱- دانشجوی دکتری زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

۳- دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله به معرفی مهاربند جدید مرکزگرا با صفحات قوسی پرداخته شده است که برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها کاربرد داشته و می‌تواند منجر به کاهش تغییر شکل ماندگار بعد از وقوع زلزله شود. بدین منظور در ابتدا اجزاء تشکیل دهنده مهاربند پیشنهادی معرفی گردیده و سپس نمونه آزمایشگاهی مهاربند ساخته شده و تحت آزمایش قرار گرفته است. رفتار مهاربند پیشنهادی استخراج گردیده و با نتایج مدلسازی نمونه در نرم افزار آباکوس مقایسه گردیده که نشان دهنده تطابق قابل قبول روش مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی بوده است. در مرحله بعد رفتار مهاربند با استفاده از نرم‌افزار آباکوس تحت بارگذاری چرخه‌ای استخراج شده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که مهاربند پیشنهادی دارای رفتار هیستریزیس پرچمی شکل کامل می‌باشد. در ضمن مطالعات پارامتری جهت بررسی بهتر رفتار مهاربند پیشنهادی انجام شده است. پارامترهایی که در نظر گرفته شده است شامل ضخامت، شعاع انحنا، عرض فنر قوسی می‌باشد. مطالعات پارامتری نشان داد که با افزایش عرض صفحه قوسی میزان استهلاک انرژی افزایش یافته و ظرفیت باربری عضو کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت صفحه فولادی ظرفیت استهلاک انرژی افزایش قابل توجه می‌یابد. علاوه بر آن وقتی که ضخامت صفحه فولادی افزایش می‌یابد توانایی تغییرشکل الاستیک بیشتر شده و وارد شدن به ناحیه پلاستیک به سختی صورت می‌گیرد.

کلمات کلیدی: مهاربند مرکزگرا، شبیه‌سازی اجزاء محدود، صفحات قوسی، تحلیل چرخه‌ای، میرایی، رفتار هیستریزیس پرچمی

| شناسه دیجیتال: | | سابقه مقاله: | | | | |
|----------------|---|--------------|--|------------|-----------------|------------|
| doi: | 10.22065/jsce.2024.422590.3256 | چاپ | انتشار آنلاین | پذیرش | بازنگری | دریافت |
| | https://doi.org/10.22065/jsce.2024.422590.3256 | ۱۴۰۴/۰۱/۳۱ | ۱۴۰۳/۰۵/۰۳ | ۱۴۰۳/۰۵/۰۳ | ۱۴۰۳/۰۳/۲۵ | ۱۴۰۲/۰۹/۲۴ |
| | | | سهیل منجمی نژاد | | *نویسنده مسئول: | |
| | | | soh.monajeminejad@iauctb.ac.ir | | پست الکترونیکی: | |

۱- مقدمه

سیستم مهاربند سنتی در سازه‌ها به عنوان سیستم مقاوم لرزه‌ای برای بهبود سختی جانبی و عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها به کار گرفته می‌شود، مهاربندهای فولادی سنتی یا مهاربندهای فولادی کمانش‌ناپذیر (BRB) در رده استهلاک انرژی میرا می‌باشند که دارای رفتار الاستوپلاستیک هستند. اگرچه مهاربند دارای رفتار هیسترتیک مطلوب می‌باشد، ولی دارای مشکلاتی از جمله دریافت‌های ماندگار بیش از حد، خرابی‌های بعد از وقوع زلزله که منجر به جابجایی بیش از حد در طبقات می‌شود، است. براساس تحقیق مک کورمیک نشان داده شده است که هزینه نگهداری این نوع مهاربندها در مقایسه با هزینه ساخت مجدد آنها زمانی که تغییر شکل ماندگار در سازه‌ها بیش از ۵٪ باشد بیشتر می‌باشد، لذا سیستم مرکزگرایی به سیستم‌های مهاربندی که دارای رفتار هیسترتیک مطلوب می‌باشد، معرفی گردید. در سیستم‌های مرکزگرا پاسخ هیسترتیک پرچمی به عنوان وجه مشترک در رفتار این نوع سیستم‌ها می‌باشد. تحقیقات متعددی در خصوص سیستم‌های مهاربند مرکزگرا انجام شده است. الیری^۱ و همکارانش [۱، ۲] در سال ۲۰۱۲ یک سیستم جدید برای قاب‌های مهاربندی هم محور معرفی نمودند که در آن از کابل‌های پیش‌تنیده استفاده نمود تا رفتار مرکزگرایی را به قاب مهاربندی شده هم محور بدهد. نکات حائز اهمیت در این قاب این است که اتصال تیر به ستون می‌تواند حول محل اتصال بال تیر به ستون دوران کند و از این طریق بازشدگی مورد نیاز را ایجاد نماید. همچنین ورق اتصال انتهایی مهاربندها تنها به بال تیر متصل است و آزادی کامل را برای چرخش اتصال فراهم می‌کند. در این قاب المان مهاربند دچار تغییرشکل‌های غیرارتجاعی شده و وظیفه استهلاک انرژی را انجام می‌دهد. چن^۲ و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۲ امکان استفاده از رفتار مرکزگرا در تیر اتصال با بادبند برون محور را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دهنده رفتار مناسب این نوع مهاربند در رفتار سازه بوده است. میلر^۳ و همکاران [۴، ۵] در سال ۲۰۱۲، یک نوع از مهاربند کمانش‌تاب را با قابلیت مرکزگرایی مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که در این نوع مهاربند، هسته از طریق تسلیم در کشش و فشار انرژی را مستهلک می‌کند و میله‌های آلیاژ هوشمند که به صورت پیش‌کشیده اجرا می‌شوند، به منظور غلبه بر نیروی تسلیم، ایجاد سخت‌شدگی کرنشی و ایجاد مرکزگرایی استفاده می‌شوند. براکنی^۴ و همکاران [۶] مهاربند جدیدی را برای کاربرد در مقاوم‌سازی و طرح از ابتدای سازه‌ها ابداع کرده‌اند. در این مهاربند از خاصیت یکپارچه بین مستهلک‌کننده‌های فلزی و کابل‌های پیش‌تنیده استفاده گردید. برونو^۵ در سال ۲۰۰۷ [۷] سه سیستم باربر جانبی را به صورت آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه کرد که عبارتند از: سیستم دیوار برشی فولادی، سیستم با مهاربندهای کمانش‌تاب و سیستم با حرکت گهواره‌ای. در سیستم با حرکت گهواره‌ای از یک قاب پنج طبقه با یک دهانه در هر سمت استفاده شده بود که می‌تواند حول پایه‌های خود دوران کند. همچنین المان‌هایی در پای سازه استفاده شده‌اند که می‌توانند علاوه بر ایجاد سختی مورد نیاز، استهلاک انرژی را نیز تامین کنند. اترتون، حجار^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۸] سیستم مهاربند مرکزگرا با حرکت گهواره‌ای را بیان کردند. در این سیستم دو قاب مهاربندی شده در کنار هم قرار دارند که اتصال آنها از طریق فیوزهایی است که قابلیت استهلاک انرژی دارند. هر یک از این قاب‌ها در طول بارگذاری الاستیک باقی مانده و نیروی مرکزگرایی سیستم توسط نیروهای ثقلی سیستم و نیروی ایجاد شده در کابل‌های پیش‌تنیده تامین می‌شود. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که آسیب وارده در این سیستم می‌تواند در فیوزها متمرکز شده و به همین دلیل تغییرشکل ماندگار ناچیزی در سازه ایجاد می‌شود. سما، دیرلین^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۹] سیستم مهاربند مرکزگرا با حرکت گهواره‌ای را بررسی کردند. در این سیستم قاب مهاربندی شده الاستیک وجود دارد که حول پای خود می‌تواند دوران کند. کابل‌های پیش‌تنیده برای اضافه کردن قابلیت مرکزگرایی استفاده شده‌اند و همچنین در پای سازه از فیوز پروانه‌ای برای استهلاک انرژی استفاده شده است. پی چی^۸ و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۹ به مطالعه پارامتری لرزه‌ای ساختمان‌های قابی فولادی با مهاربندهای صرفاً کششی مرکزگرا پرداختند. بدین منظور مطالعه پارامتری در پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بلند مرتبه و متوسط مرتبه (۹ و ۱۶ طبقه) با مهاربندهای کششی مرکزگرای جدید انجام گرفت. سه پارامتر کلیدی شامل ضریب کاهش سختی، کرنش فعال سازی و سختی محوری اولیه مورد بررسی قرار

¹ O'Reilly² Cheng³ Miller⁴ Braconi⁵ Bruneau⁶ Eatherton⁷ Ma⁸ Chi

گرفت. نتایج نشان داد که افزایش ضریب کاهش سختی می‌تواند سختی ثانویه سیستم مرکز گرای فولادی را بهبود داده و منجر به توزیع یکنواخت دررفت های بین طبقه گردد. رهگذر و مقدم^۹ در سال ۲۰۱۹ [۱۱] به بررسی پیشنهاد ضرایب طراحی لرزه‌ای شامل ضرایب کاهش پاسخ، اضافه مقاومت و شکل پذیری برای قاب فولادی مرکز گرا دارای حرکت گهواره‌ای پرداختند. نتایج حاکی از آن است که قاب‌های کنترل شده مرکزگرا معیارهای پذیرش را تامین نموده و طراحی این سیستم با ضرایب پیشنهادی حاشیه ایمنی کافی را در برابر فروریزش فراهم می‌آورد. اصغری و قناعت پیشه^{۱۰} در سال ۲۰۱۷ [۱۲] به بررسی رفتار لرزه‌ای قاب مهاربندی واگرای مرکزگرا با فیوزهای توزیع شده در ارتفاع پرداختند. بدین منظور در این تحقیق رفتار قاب مهاربندی واگرای مرکز گرا با فیوزهای توزیع شده که مشخصات سازه های قابل تعمیر بعد از زلزله را دارند قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده آن بوده است که دررفت طبقات در سازه گهواره‌ای در کلیه طبقات یکسان است و همچنین تغییر شکل ماندگار بسیار جزئی بعد از زلزله وجود دارد. گریگوریان^{۱۱} و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۱۳] به بررسی نوآوری در قاب دیوارهای گهواره‌ای مقاوم لرزه‌ای پرداختند. بدین منظور یک سیستم سازه ای جدید به نام (RWMFS¹²) که ترکیبی از دیوارهای پس تنیده گهواره ای با قاب‌های خمشی معرفی نمودند. نتایج نشان دهنده آن بوده است که این سیستم سطح عملکرد آستانه فروریزش و مرکزگرایی را تامین می‌کند و قابلیت تعمیرپذیری را دارد. زی^{۱۳} و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۴] به بررسی آزمایشگاهی در عملکرد هیسترتیک مهاربندهای کمانش ناپذیر مرکز گرا با فیوز های اصطکاکی پرداختند. در این تحقیق یک مهاربند کمانش ناپذیر مرکزگرای با فیوز اصطکاکی با در نظر گرفتن یک ابزار اصطکاکی در انتهای مهاربند برای افزایش ظرفیت شکل پذیری این سیستم پیشنهاد شد. فعال سازی فیوز می‌تواند به طور موثری ظرفیت شکل پذیری مهاربند را افزایش بدهد. همچنین تحلیل دینامیکی سازه ها نشان داد که استفاده از فیوزهای اصطکاکی نه تنها از ایجاد طبقه نرم و خرابی سازه جلوگیری می‌کند بلکه باعث کاهش دررفت ماندگار در سازه می‌گردد. ونگ^{۱۴} و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۵] به بررسی مهاربند کابلی مرکز گرا با ابزار اصطکاکی برای بهبود عملکرد لرزه ای سازه های قاب بتنی پرداختند. بدین منظور طرح سازه ای و رابطه بار-جابجایی مهاربند پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای به منظور نشان دادن تاثیر این نوع مهاربند انجام شده و با استفاده از مدلسازی عددی نتایج صحت سنجی گردید. علاوه بر آن تحلیل پارامتری جهت بررسی تاثیر سختی تاندون و اصطکاک در عملکرد هیسترتیک این مهاربند انجام شد. سپس مهاربند کمانش ناپذیر و پیشنهادی را در مقاوم سازی یک قاب بتنی ۹ طبقه مورد بررسی قرار داد. سان^{۱۵} و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۶] مطالعات آزمایشگاهی در مهاربند استهلاک انرژی مرکز گرا که شامل ابزار استهلاک انرژی تشکیل یافته از پدهای اصطکاکی، یک ابزار مرکز گرا متشکل از فنرهای دیسکی و عضو مهاربندی می‌باشد، انجام داده‌اند مهاربند پیشنهادی قابلیت نصب و تنظیم آسان و مکانیزم ساده می‌باشد نتایج آزمایش چرخه‌ای در سیستم پیشنهادی نشان داد که این نوع سیستم دارای قابلیت استهلاک انرژی پایدار بدون از بین رفتن پدهای اصطکاکی یا شل شدگی بولت های با مقاومت بالا می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که این مهاربند پاسخ های هیسترتیک پرچمی شکل و دارای سختی هموار در مراحل مختلف می‌باشد این نتایج نشان دهنده عملکرد لرزه‌ای مناسب این نوع مهاربند بوده است. رئیس زاده و همکاران [۱۷] روش جدیدی جهت کاهش اثرات مودهای بالاتر در سیستم های گهواره‌ای مهاربندی مرکزگرا پرداختند. بدین منظور پنج سازه ۱۲ طبقه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دهنده بهبود عملکرد لرزه‌ای و کاهش اثرات مودهای بالاتر در حالت استفاده از مهاربندها و ستون های کمانش تاب در طبقات، در مقایسه با حالت سیستم مهاربندی گهواره‌ای مرکزگرای متداول بوده است. محمدی و همکاران [۱۸] به معرفی سیستم جدید ترکیبی از اتصال پس کشیده کابلی برای اتصالات تیرها و ستونها به منظور تأمین خودمرکزی و از اتصال لغزشی اصطکاکی نامتقارن در مهاربند برای تأمین اتلاف انرژی پرداخته و با نتایج سیستم متداول قاب خمشی فولادی دوگانه مقایسه گردید. نتایج نشان داد که افزودن اتصال پس کشیده کابلی و اتصال لغزشی اصطکاکی نامتقارن به قاب خمشی فولادی دوگانه، باعث کاهش جابجایی نسبی طبقات، جابجایی نسبی ماندگار طبقات و در نتیجه کاهش قابل ملاحظه آسیب پذیری آن می‌شود. باوندی و همکاران [۱۹] شاخص کارایی سیستم‌های قاب خمشی فولادی دارای اتصالات مرکزگرا با استفاده از متدولوژی شاخص‌های پراکندگی را معرفی نمودند.

⁹ Rahgozar

¹⁰ Asghari

¹¹ Grigorian

¹² Rocking wall moment frames

¹³ Xie

¹⁴ Guo

¹⁵ Sun

بدین منظور دو ساختمان ۳ و ۹ طبقه فولادی با شش نوع اتصال مرکزگرا برای هر قاب با هفت شاخص پراکندگی تحت ارزیابی قرار گرفت که نتایج نشان داد که کاهش میزان پراکندگی پاسخها نشان دهنده کارتر بودن سیستم مورد بررسی می‌باشد. یوسف بیک و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۲۰] یک نوع جدید مهاربند مرکزگرا با رفتار پرچمی شکل با سختی پس الاستیک صفر را پیشنهاد دادند. نمونه مهاربندی پیشنهادی مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج حاصل با نتایج مدلسازی مورد مقایسه قرار گرفت. سپس کاربرد مهاربند پیشنهادی در قاب فولادی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دهنده تاثیر قابل توجه مهاربند پیشنهادی در رفتار لرزه‌ای قابها بوده است. لانگ هی و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۲۱] مهاربند جدیدی را پیشنهاد داده و عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها را مورد بررسی قرار دادند. در این مهاربند از فنرهای دیسکی برای ایجاد مرکز گرایی استفاده شده است. به منظور استخراج رفتار مهاربند پیشنهادی آزمایشات چرخه ای انجام گردیده است. نتایج آزمایش نشان دهنده رفتار پرچمی شکل کامل مهاربند پیشنهادی، قابلیت استهلاک انرژی بالا و ظرفیت باربری نهایی قابل توجه عضو بوده است. همچنین نتایج نشان داد که مهاربند پیشنهادی قابلیت حذف ۹۶ درصد تغییر شکل ماندگار بوده است. در این تحقیق به معرفی یک مهاربند فولادی با خاصیت مرکزگرایی پرداخته شده است که در مقایسه با سایر مهاربندها دارای ظرفیت نیروی محوری بالا، استهلاک انرژی قابل توجه، سادگی ساخت متناسب با امکانات موجود در ایران و عدم نیاز به نیروی متخصص اشاره نمود. همچنین از ویژگی‌های منحصر به فرد مهاربند پیشنهادی می‌توان به تنظیم سختی و عملکرد مرکزگرایی فنرها با تغییر آرایش فنرها و نیز قابلیت جایگزینی ساده صفحات قوسی بعد از وقوع زلزله اشاره نمود. در این مهاربند خاصیت مرکزگرایی توسط صفحات قوسی و فنرها می‌باشد که صفحات قوسی نقش استهلاک انرژی و فنرها نقش مرکزگرایی این دو سیستم را دارد. ساختار کلی مقاله به شرح زیر می‌باشد:

الف) معرفی ساختار و اعضای تشکیل دهنده مهاربند پیشنهادی؛

ب) جزئیات نمونه آزمایشگاهی و تعیین رفتار آن؛

پ) صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی با نایج مدلسازی در نرم افزار اجزای محدود آباکوس؛

ت) مطالعات پارامتری و تاثیر پارامترهای هندسی عضو پیشنهادی در رفتار عضو پیشنهادی.

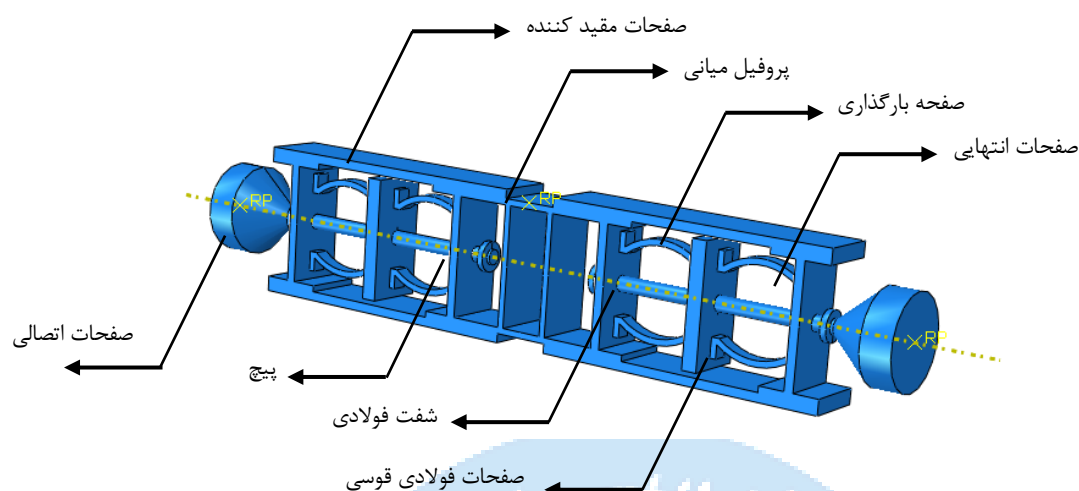
۲- مهاربند مرکزگرایی پیشنهادی

پس از بررسی کلیه مهاربندهای مرکزگرا پیشین، با توجه به مصالح موجود و امکانات ساخت در ایران، مهاربند مرکزگرایی با صفحات قوسی پیشنهاد می‌گردد. مهاربندهای پیشنهادی قبلی دارای چندین نکته منفی از جمله دشواری ساخت، هزینه بالا، جذب انرژی پایین و ظرفیت محدود نیروی محوری بودند. در شکل ۱ طرح شماتیک مهاربند مرکزگرایی پیشنهادی نشان داده شده است این مهاربند از سه قسمت اصلی تشکیل شده است. ۱- سیستم استهلاک انرژی؛ ۲- سیستم مرکزگرا؛ ۳- قسمت محصورکننده.

سیستم استهلاک انرژی شامل صفحات قوسی می‌باشد که استهلاک انرژی توسط تغییر شکل خمشی صفحات صورت می‌گیرد. سیستم مرکزگرایی نیز توسط فنرها تأمین شده و قسمت محصورکننده نیز شامل صفحات بارگذاری، صفحات اتصال و میله می‌باشد که میله نقش اتصال فنر به صفحات را دارد. همچنین اتصال میله به پروفیل که در وسط مهاربند پیشنهادی قرار دارد مهاربند را براساس عملکرد استهلاک انرژی تنظیم می‌کند طول مهاربند به آسانی می‌تواند تنظیم گردد. در شکل ۱ اجزای تشکیل دهنده مهاربند نشان داده شده است. روند مونتاژ مهاربند پیشنهادی به صورت زیر می‌باشد که در جدول ۱ نشان داده شده است:

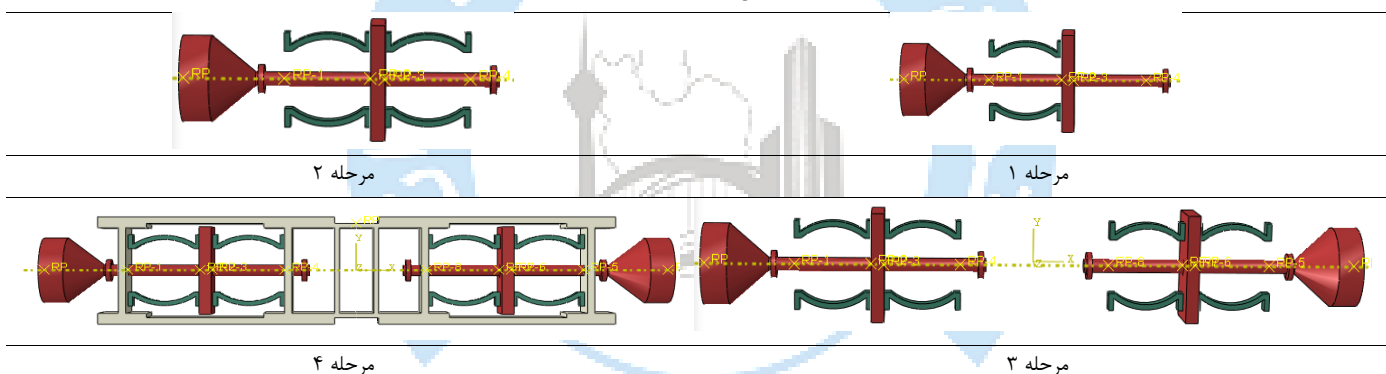
- ۱) عبوردهی میله از سوراخ مرکزی صفحه و مهار آن توسط پیچ یک در قسمت بیرونی صفحه؛
- ۲) قرارگیری فنرها در مرکز میله که توسط دو پیچ فنرها فشرده شده تا پیش تنیدگی ایجاد گردد؛
- ۳) صفحات بارگذاری از میله عبور داده شده و به بولت ۲ در طرف دیگر صفحه بارگذاری مهار می‌شود. مطابق با مرحله قبلی فنرها در طرف دیگر صفحه بوسیله پیچ یک پیش تنیده می‌گردند؛
- ۴) صفحات قوسی به صفحات بارگذاری و انتهای صفحه بولت شده و به قسمت محصورکننده مقید می‌شوند. سپس هر قسمت مهاربند در هر طرف توسط اتصال میله پروفیل و به صفحات اتصال دهنده وصل می‌شود. ساخت، مونتاژ و نصب سیستم مهاربند

پیشنهادی ساده بوده و عملکرد مرکزگرای فنر و سختی مهاربند می تواند بوسیله تغییر دادن آرایش و مدل فنرها قابل تنظیم می باشد.

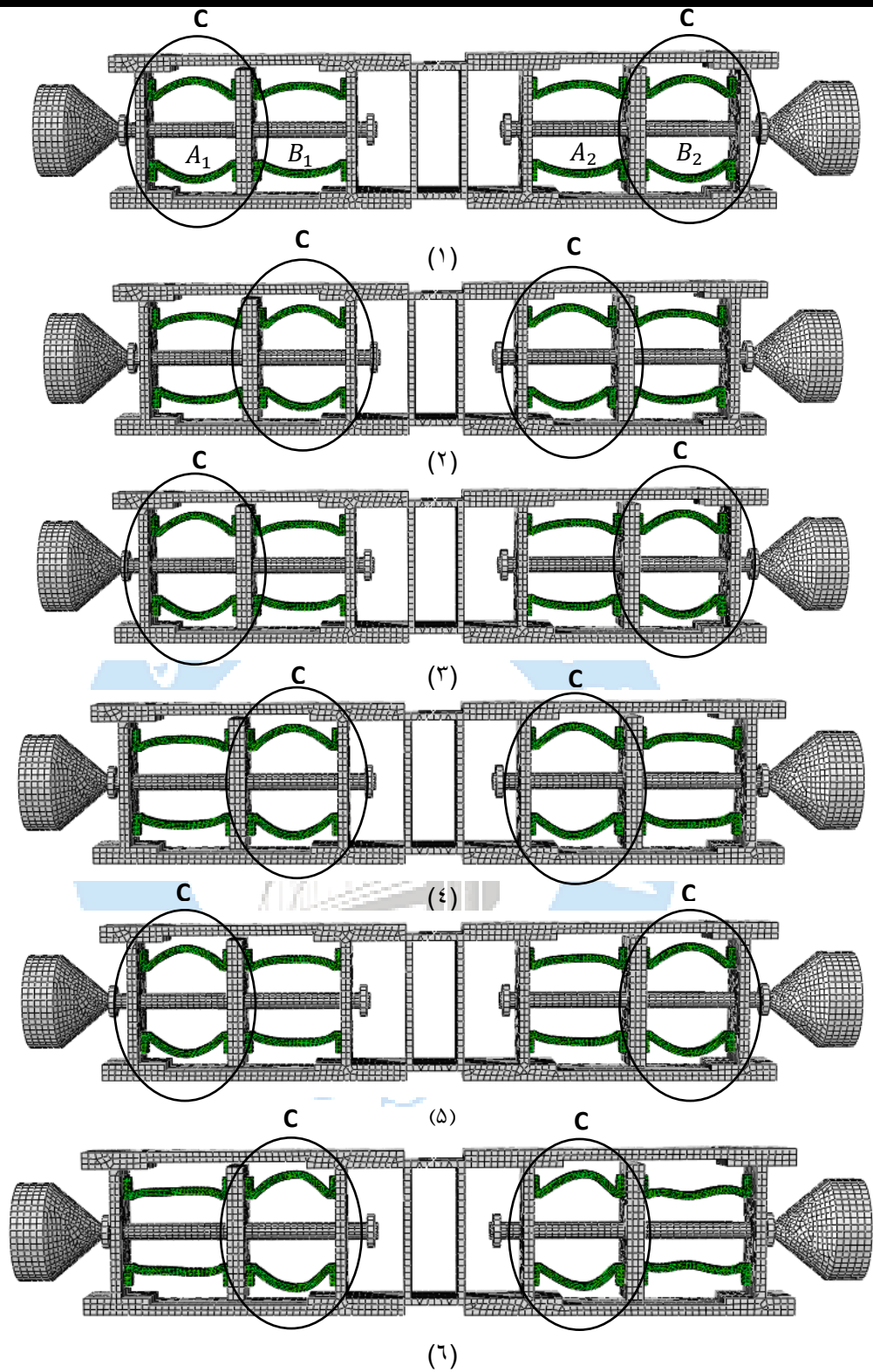


شکل ۱: شکل شماتیک مهاربند مرکز گرا.

جدول ۱: مراحل مونتاژ مهاربند مرکز گرا.



مهاربند پیشنهادی دارای رفتار کششی و فشاری متقارن بوده به گونه ای که وضعیت تنش مهاربند در کشش و فشار یکسان می باشد. با توجه به شکل ۲ مشاهده می گردد، زمانی که مهاربند در کشش می باشد صفحات اتصالی به صفحات بارگذاری در هر دو طرف توسط میله حرکت کرده و صفحات قوسی A_1 و B_1 تحت فشار و صفحات قوسی در نواحی A_2 و B_2 تحت کشش قرار می گیرند که صفحات فولادی قوسی باعث استهلاک انرژی زلزله به دلیل تغییر شکل می گردد. فنرهای نواحی A_1 و B_1 که تحت فشار قرار می گیرند نیروی بازگرداننده ای در خلاف جهت فشار ایجاد می کنند. در وضعیت فشرده اصل کار آن مشابه وضعیت کششی می باشد. زمانی که تکیه گاه ها در کار می باشند، دو ناحیه تاب آوری و استهلاک انرژی را فراهم می کند.



شکل ۲: مکانیزم مهاربند مرکزگرای پیشنهادی.

۳- مدل مکانیکی

۳-۱- محاسبه نیروی داخلی صفحات قوسی فولادی

در این بخش به بررسی مدل مکانیکی مهاربند پیشنهادی پرداخته شده است. بدین منظور قسمت‌های مختلف تشکیل دهنده مهاربند مورد بررسی قرار گرفته است. مدل مکانیکی صفحات قوسی، ضخامت و عرض به نقطه ثابت در یک انتها و یک نقطه آزاد در انتهای دیگر که می‌تواند آزادانه حرکت کند ساده سازی شده است. جابجایی و زاویه دوران سیستم در راستای X_1 و X_2 به صورت معادله ۱ می‌باشد

$$\begin{aligned} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1p} &= 0 \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2p} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

با فرض جابجایی صفحه قوسی برابر $ds=Rd\theta$ داریم:

$$\delta_{11} = \int \frac{\overline{M}_1^2}{EI} ds = \int_{\varphi}^{\pi-\varphi} \frac{R^3(\cos\varphi - \cos\theta)^2}{EI} d\theta = \frac{R^3}{EI} \left[(\pi - 2\varphi)\cos^2\varphi + \frac{\pi - 2\varphi - \sin 2\varphi}{2} \right] \quad (2)$$

$$\delta_{21} = \delta_{12} = \int \frac{\overline{M}_1 \overline{M}_2}{EI} ds = \int_{\varphi}^{\pi-\varphi} \frac{R^3(\cos\varphi - \cos\theta)^2}{EI} d\theta = \frac{R^3}{EI} \left[(\pi - 2\varphi)\cos^2\varphi + \frac{\pi - 2\varphi - \sin 2\varphi}{2} \right] \quad (3)$$

$$\delta_{22} = \int \frac{\overline{M}_2^2}{EI} ds = \frac{R}{EI}(\pi - 2\varphi) \quad (4)$$

$$\Delta_{1p} = \int \frac{\overline{M}_1 \overline{M}_p}{EI} ds = \int_{\varphi}^{\pi-\varphi} \frac{PR^3(\cos\varphi - \cos\theta)(\sin\theta - \sin\varphi)}{EI} d\theta = \frac{PR^3}{EI} [2\cos^2\varphi - (\pi - 2\varphi)\sin\varphi\cos\varphi] \quad (5)$$

$$\Delta_{2p} = \int \frac{\overline{M}_2 \overline{M}_p}{EI} ds = \int_{\varphi}^{\pi-\varphi} -\frac{PR^2(\sin\theta - \sin\varphi)}{EI} d\theta = \frac{PR^2}{EI} [(\pi - 2\varphi)\sin\varphi - 2\cos\varphi] \quad (6)$$

با استفاده از روابط مذکور معادله زیر بدست می‌آید:

$$X_1 = 0; X_2 = \frac{PR[2\cos\varphi - (\pi - 2\varphi)\sin\varphi]}{\pi - 2\varphi} \quad (7)$$

معادله نیروی داخلی صفحات قوسی به صورت زیر است:

$$M = \overline{M}_1 X_1 + \overline{M}_2 X_2 + M_p = PR \cdot \left[\sin\theta - \frac{2\cos\varphi}{\pi - 2\varphi} \right] \quad (8)$$

۳-۲- محاسبه سختی صفحه فولادی

سختی صفحه فولادی از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$\overline{M}_p = R(\sin\theta - \sin\varphi); M = \overline{M}_1 X_1 + \overline{M}_2 X_2 + M_p = PR \cdot \left[\sin\theta - \frac{2\cos\varphi}{\pi - 2\varphi} \right] \quad (9)$$

۳-۳- جابجایی سمت چپ برابر است با:

$$\Delta = \int \frac{M \cdot \overline{M}_p}{EI} ds = \frac{PR^3}{EI} \int_{\varphi}^{\pi-\varphi} (\sin\theta - \sin\varphi) \left(\sin\theta - \frac{2\cos\varphi}{\pi - 2\varphi} \right) d\theta = \frac{PR^3}{EI} \left(\frac{\pi - 2\varphi + \sin 2\varphi}{2} - \frac{2\cos^2\varphi}{\pi - 2\varphi} \right) \quad (10)$$

سختی صفحه صفحات قوسی برابر است با:

$$K_{steel} = \frac{1}{f} = \frac{P}{\Delta} \quad (11)$$

زمانی صفحات قوسی فولادی تسلیم می‌شود، سختی آن کاهش می‌یابد. مدول الاستیسیته بعد از تسلیم شدن برابر با ۵ درصد قبل تسلیم شدن می‌باشد. بنابراین سختی پس از تسلیم صفحات قوسی فولادی برابر با $E_y = 0.05E$ می‌باشد.

۳-۴- جابجایی و نیروی تسلیم

تنش نرمال در لبه بیرونی صفحات قوسی برابر با برابر با σ_y و لنگر حدی الاستیک M_e صفحات قوسی در محدود الاستیک در لبه برابر است با:

$$M_e = \frac{bh^2\sigma_y}{6} \quad (12)$$

بنابراین لنگر خمشی حد پلاستیک M_p برابر است با:

$$M_p = \xi M_e = \frac{\xi bh^2\sigma_y}{6} \quad (13)$$

که ξ ضریب شکل مقطع می‌باشد. زیرا مقطع صفحات قوسی فولادی مستطیل می‌باشد. ضریب شکل برابر ۱/۵ می‌باشد. b عرض صفحات قوسی فولادی و h ضخامت صفحات قوسی فولادی هست. گشتاور خمشی با جایگزینی $\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi$ و $\theta = \frac{\pi}{2}$ برابر است با:

$$M_{\theta=\frac{\pi}{2}} = \bar{M}_1 X_1 + \bar{M}_2 X_2 + M_p = PR \cdot \left[1 - \frac{2\cos\varphi}{\pi-2\varphi} \right] \quad (14)$$

$$M_{\theta=\pi-\varphi} = M_{\theta=\varphi} = \bar{M}_1 X_1 + \bar{M}_2 X_2 + M_p = PR \cdot \left[\sin\varphi - \frac{2\cos\varphi}{\pi-2\varphi} \right] \quad (15)$$

با مقایسه A و B داریم، $M_{\theta=\frac{\pi}{2}} > M_{\theta=\varphi}$ بنابراین مفاصل پلاستیک در انتهای صفحات قوسی و وسط دهانه تشکیل می‌گردد. با جایگزینی معادلات ۱۱ و ۱۲ بار تسلیم شدن بدست می‌آید که برابر است با:

$$P_y = \frac{\xi bh^2\sigma_y}{6R \cdot \left(1 - \frac{2\cos\varphi}{\pi-2\varphi} \right)} \quad (16)$$

بنابراین جابجایی تسلیم برابر است با $\Delta_y = \frac{P_y}{K_{steel}}$.

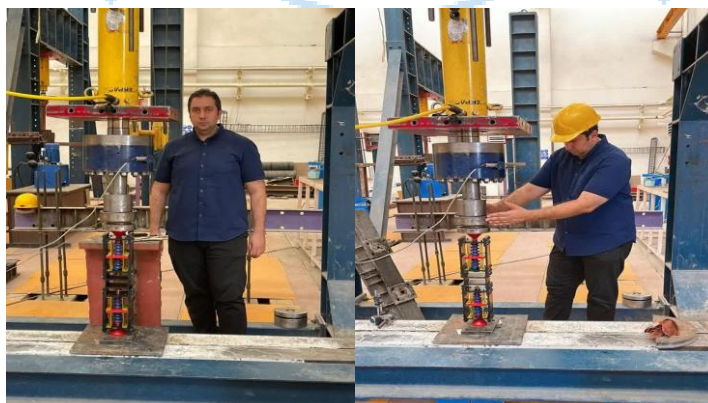
۴- نمونه آزمایشگاهی

در این بخش به بررسی نمونه آزمایشگاهی مهاربند پیشنهادی پرداخته شده است. لذا در ابتدا اجزای تشکیل دهنده مهاربند توضیح داده شده و سپس روند انجام آزمایش توضیح داده می‌شود. نمونه آزمایشگاهی شامل بخش‌های زیر می‌باشد فنر، صفحات قوسی، صفحات بارگذاری، غلاف فولادی (پروفیل میانی I شامل و چهار پروفیل کناری I شکل)، میله‌های dowel و اتصالات می‌باشد. مهاربند پیشنهادی شامل چهار گروه فنر و هشت گروه صفحات قوسی می‌باشد که با مقیاس ۱ به ۳ ساخته شده است. نحوه ساخت و مونتاژ مهاربند پیشنهادی به این صورت می‌باشد در ابتدا میله فولادی dowel از سوراخ مرکزی پروفیل عبور داده شده و با مهره ۱ در بخش بیرونی صفحه‌های انتهایی مهار می‌گردد. میله dowel از مرکز فنر عبور داده می‌شود. بعد از آنکه فنر از میله dowel عبور داده شدند، صفحه بارگذاری از میله dowel عبور داده شده و فنر دوم قرار گرفته و انتهای دیگر فنر به پروفیل دیگر وصل شده و توسط مهره ۲ مهار می‌گردد. مطابق گام قبلی فنرها در طرف دیگر قرار گرفته و صفحات انتهایی از میله dowel عبور داده شده و مجدداً با مهره ۱ مهار می‌گردند. سپس صفحات قوسی که نقش استهلاک انرژی را دارند قرار داده می‌شوند. لازم به ذکر می‌باشد که این صفحات به صفحات بارگذاری و انتهایی و نیز به صفحات مقید کننده مهار می‌گردند. در مرحله آخر دو بخش مهاربند توسط پروفیل میانی به هم اتصال گردیده و به تکیه گاه‌ها در انتها نصب می‌گردند. از ویژگی‌های منحصر به فرد این مهاربند می‌توان به سادگی ساخت، مونتاژ و نصب آن اشاره نمود. سختی و مرکز گرایی مهاربند را می‌توان با آرایش فنرها تنظیم نمود. در شکل ۳ مراحل مونتاژ نشان داده شده است.



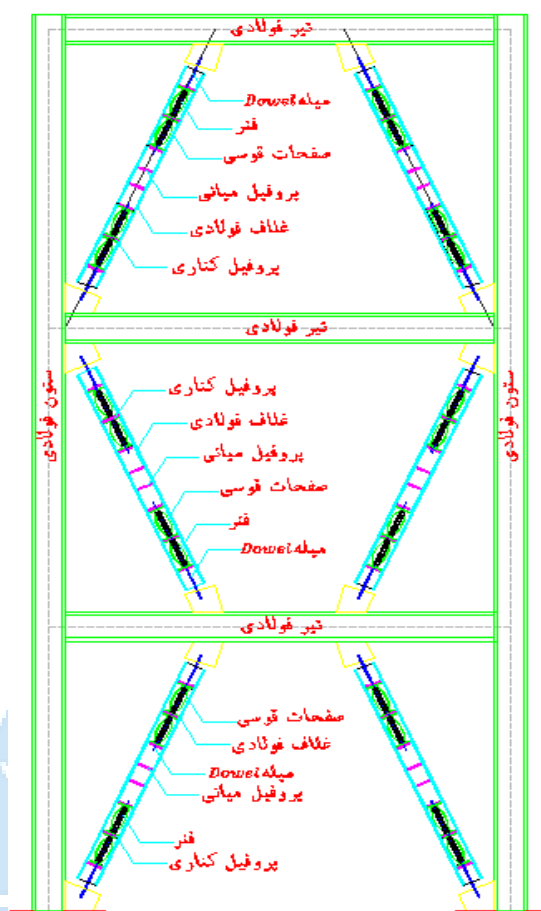
شکل ۳: مراحل مونتاژ نمونه مهاربند پیشنهادی.

نمونه آزمایشگاهی در دانشگاه صنعتی سهند تبریز مورد آزمایش قرار گرفته و رفتار مهاربند استخراج گردیده است. در شکل ۴، set up آزمایشگاهی نشان داده شده است. با توجه به شکل جک بارگذاری در قسمت بالایی نمونه قرار داده شده و به صورت بار مونوتونیک به نمونه اعمال گردیده است. در گام بارگذاری میزان تغییر کل محوری مهاربند قرائت گردیده و رفتار مهاربند تعیین می‌گردد. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد که در اثر اعمال بار عضو مهاربندی رفتار شکل پذیر از خود نشان داده و در عضو کامانشی صورت نمی‌گیرد.



شکل ۴: set up آزمایشگاهی نمونه مهاربند پیشنهادی

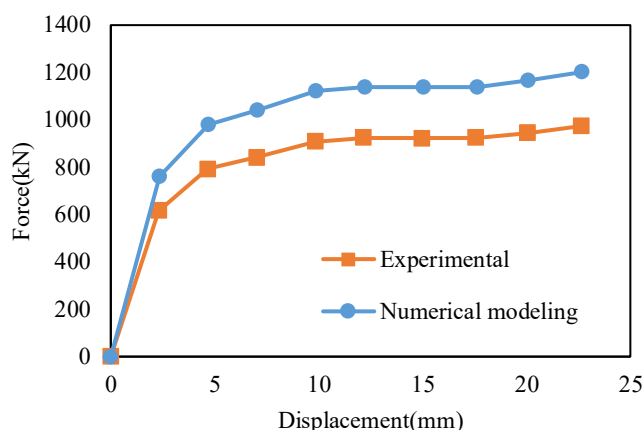
با توجه به مهاربند پیشنهادی، نحوه قرارگیری مهاربند در قاب فولادی مطابق شکل ۵ می‌باشد. با توجه به نوع مهاربند پیشنهادی مشاهده می‌گردد که نوع آرایش مهاربند به صورت ۷ و ۸ می‌تواند در قاب ساختمانی قرار بگیرد.



شکل ۵: نحوه قرارگیری مهاربند در قاب فولادی.

۱-۴ - صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی با مدل عددی

در این بخش به مدلسازی عددی نمونه مهاربندی در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS پرداخته شده است. در روند مدلسازی مهاربند در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS از المان C3D8R solid استفاده شده است. مشخصات مکانیکی مصالح بکار گرفته شده در جدول ۳ ارائه شده است. برای ساده سازی نمونه مدل، بهبود سرعت محاسباتی، کاهش مشکلات واگرایی تاثیر بولت ها در مدلسازی صرف نظر گردیده است. از اتصال Tie بین صفحات مقید کننده، پروفیل ها، مهره ها استفاده شده است. بارگذاری به نمونه مدلسازی شده به صورت مونوتونیک می باشد. نتایج مدلسازی نمونه در نرم افزار اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است که نشان دهنده تطابق قابل قبول نتایج می باشد. همچنین در جدول ۲ مقاومت نهایی، سختی اولیه و میزان استهلاک انرژی نمونه آزمایشگاهی با نتایج عددی مقایسه شده است. با توجه به نتایج مشاهده می گردد که درصد خطای مدلسازی عددی با نمونه آزمایشگاهی در تخمین سختی اولیه، ظرفیت نهایی و میزان استهلاک انرژی به ترتیب برابر ۲۱، ۲۳/۴ و ۲۳/۴ درصد می باشد که نشان دهنده تطابق نسبتاً خوب بین نتایج آزمایشگاهی و عددی می باشد.



شکل ۶: مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی.

جدول ۲: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی نمونه مهاربند پیشنهادی.

| درصد خطا | نمونه آزمایشگاهی | مدلسازی عددی | |
|----------|------------------|--------------|-----------------------------|
| ۲۱٪ | ۲۶۶ | ۳۲۴ | سختی اولیه (kN/mm) |
| ۲۳.۴٪ | ۹۷۳ | ۱۲۰۱ | ظرفیت نهایی (kN) |
| ۲۳.۳۹٪ | ۱۸۶۸۰ | ۲۳۰۵۱ | انرژی استهلاک یافته (kN.mm) |

۵- مدل‌سازی عددی

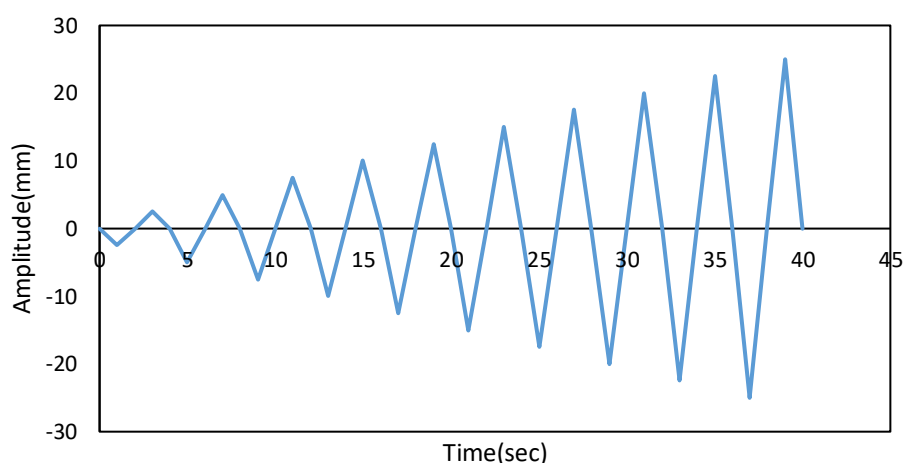
در این بخش به مدل‌سازی مهاربند مرکزگرای پیشنهادی در نرم افزار آباکوس پرداخته شده است. مدل مهاربندی در نرم افزار Solid work ایجاد شده و به نرم افزار اجزای محدود آباکوس وارد گردیده است. به منظور مدل‌سازی مهاربند پیشنهادی از المان C3D8R برای مدل‌سازی صفحات قوسی، صفحات بارگذاری و میله استفاده شده است. به منظور ساده‌سازی در روش مدل‌سازی المان فرغریختی استفاده شده است.

برای صفحات قوسی و سایر قسمت‌های مهاربند پیشنهادی، از فولاد نرمه ST37 و از مدل پلاستیک سخت شونده سینماتیک دو خطی برای مدل فولاد استفاده شده است. مدول الاستیسیته فولاد از تسلیم شونده ۵٪ مدول الاستیسیته قبل از تسلیم شونده می‌باشد یا به عبارتی $E_y = 0.05E$. همچنین برای ساده کردن مدل و نیز افزایش سرعت محاسباتی و کاهش مشکلات همگرایی از مدل‌سازی بولت‌ها (پیچ‌ها) صرف نظر شده و از اندرکش tie برای مدل‌سازی اثر اتصال بین صفحات مقید صفحات انتهایی و صفحات قوسی و صفحات بارگذاری استفاده گردیده است. مشخصات مکانیکی فولاد مصرفی در جدول ۳ ارائه شده است. به منظور تعیین رفتار هیسترتیک مهاربند مرکزگرای پیشنهادی سیستم بارگذاری جابجایی استفاده شده است. لذا یک انتهای مدل ثابت نگه داشته شده و بارگذاری چرخه‌ای جابجایی به انتهای دیگر مدل وارد می‌شود. در شکل (۳) منحنی بارگذاری جابجایی- زمان نشان داده شده است. نوع تحلیل مورد استفاده برای مهاربند پیشنهادی تحلیل دینامیکی Explicit می‌باشد.

جدول ۳: مشخصات مکانیکی مصالح فولادی

| مصالح | F_y (MPa) | F_u (MPa) | E(MPa) | ν |
|-------|-------------|-------------|--------|-------|
| ST37 | 240 | 370 | 206000 | 0.3 |

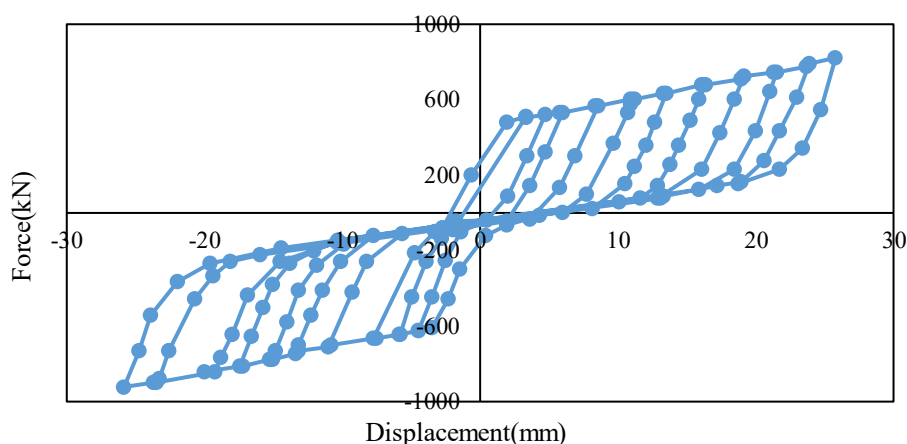
F_y تنش تسلیم فولاد، F_u تنش نهایی، E مدول الاستیسیته، ν ضریب پواسون



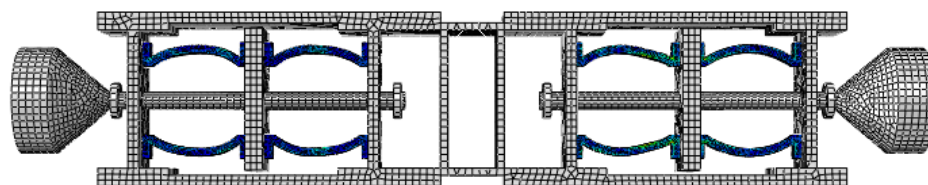
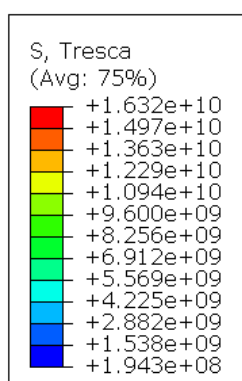
شکل ۷: تاریخچه بارگذاری.

۶- بررسی نتایج تحلیل

در این بخش رفتار مهاربند پیشنهادی تحت بار چرخه‌ای در نرم‌افزار ABAQUS استخراج گردیده است. بدین منظور با توجه به روند مدلسازی که در بخش ۳ اشاره گردیده است، مهاربند پیشنهادی مدلسازی شده و تحت بار چرخه‌ای قرار گرفته است که مدل رفتاری مهاربند پیشنهادی در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به نتایج تحلیل مشاهده می‌شود که مهاربند پیشنهادی دارای رفتار پرچمی شکل می‌باشد. همچنین با توجه به پیش‌تنیده شدن فنرها منحنی هیستریزیس مدل دارای اثر Pinching می‌باشد. نتایج مدلسازی نشان می‌دهد که اثر Pinching منحنی هیستریزیس قابل توجه می‌بوده و رفتار مرکزگرایی زمانی که نیروی پیش‌تنیدگی اعمال می‌شود، بیشتر نمود می‌شود. همچنین در شکل ۹ وضعیت تنش‌ها در مهاربند پیشنهادی براساس معیار ترسکا نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد در صفحات قوسی فولادی در اثر جابجایی تحت فشار و کشش قرار می‌گیرد. همچنین مشاهده می‌گردد که خاصیت مرکزگرایی سیستم پیشنهادی ناشی از تغییر شکل فنرها و استهلاک انرژی به صفحات قوسی ارتباط دارد. همانطور که قبلاً اشاره گردید در مدلسازی اجزای مهاربند پیشنهادی از المان solid استفاده گردیده است. با توجه به عملکرد مهاربند پیشنهادی نیروی وارده توسط صفحات قوسی تحمل می‌گردد و نیرویی به غلاف فولادی وارد نمی‌شود که این امر در مراحل آزمایش نیز مشاهده گردیده است. لذا در مدلسازی عددی مهاربند پیشنهادی نیز مشاهده می‌گردد که تمامی نیرو توسط صفحات قوسی تحمل می‌گردد که نقش استهلاک انرژی را بر عهده دارد. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد در اثر اعمال نیرو قسمتی از صفحات قوسی تحت کشش و قسمتی تحت فشار قرار می‌گیرد که این امر منجر به استهلاک انرژی مهاربند پیشنهادی می‌گردد. همچنین در شکل ۹ مکانیزم مهاربند پیشنهادی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، مکانیزم استهلاک انرژی ناشی از صفحات قوسی می‌باشد.



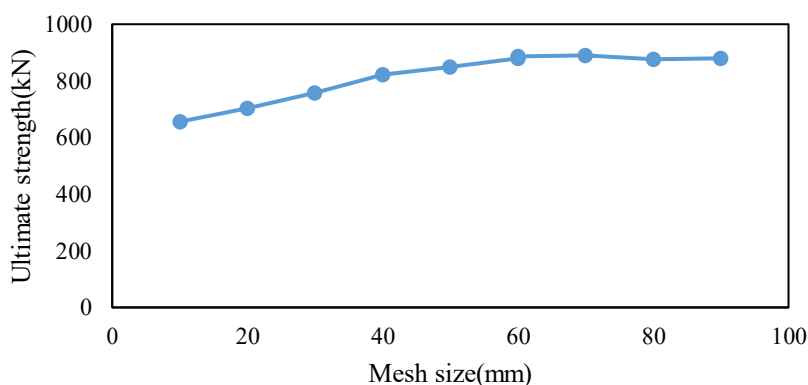
شکل ۸: رفتار چرخه‌ای مهاربند پیشنهادی.



شکل ۹: وضعیت تنش در فنرهای قوسی مهاربند پیشنهادی مرکزگرا.

۱-۶- تحلیل حساسیت

در این بخش به انجام تحلیل حساسیت برای تعیین اندازه مش بندی نمونه مدل‌سازی شده پرداخته می‌شود. بدین منظور مش با اندازه‌های مختلف در نظر گرفته شده است. پارامتر مورد بررسی مقاومت نهایی می‌باشد. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که زمانی که اندازه مش از ۴۰ میلیمتر بیشتر می‌گردد، تغییری در مقاومت نهایی حاصل نمی‌گردد. در شکل ۱۰ نتایج تحلیل حساسیت نشان داده شده است.



شکل ۱۰: تحلیل حساسیت برای تعیین اندازه مش.

۷- مطالعات پارامتری

در این بخش به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف در رفتار عضو پیشنهادی پرداخته می‌شود. پارامترهایی که مورد بررسی قرار خواهد گرفت شامل موارد زیر می‌باشد:

الف) انحنای صفحات قوسی؛

ب) عرض صفحه قوسی؛

پ) ضخامت صفحه قوسی.

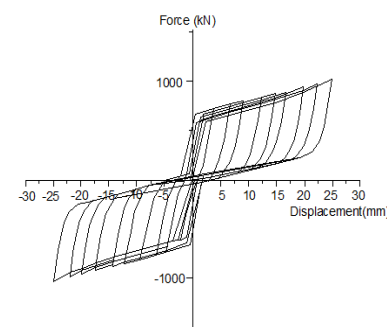
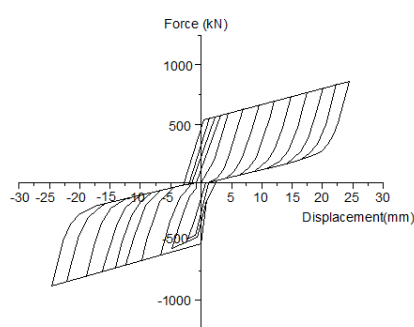
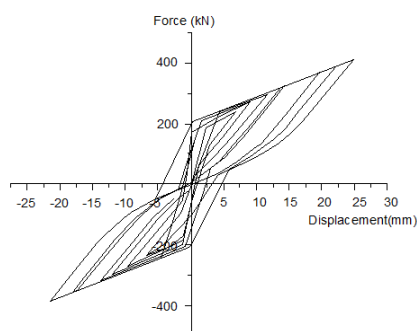
تحقیقات صورت گرفته توسط محققین مختلف در خصوص مهارندهای مرکزگرا نشان داده است که ابعاد هندسی مهاربند تاثیر زیادی در رفتار عضو دارد، لذا در این مقاله نیز به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی مذکور در رفتار عضو پیشنهادی پرداخته شده است. بدین منظور در ۳ گروه عضو مهاربندی در نرم افزار آباکوس مدلسازی شده است. گروه اول که شامل انحنای مختلف با عرض و ضخامت یکسان می‌باشد. گروه دوم شامل انحنا و ضخامت ثابت و عرض های مختلف و گروه سوم شامل انحنا و عرض ثابت و ضخامت های متغییر می‌باشد. لازم به ذکر می‌باشد طول کل المان‌ها ۵۰۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است. در جدول ۴ گروه های مورد بررسی ارائه شده است.

جدول ۴: پارامترهای در نظر گرفته برای مهاربند پیشنهادی.

| گروه | نام اختصاری | انحنا | عرض(mm) | ضخامت(mm) | طول(mm) |
|------|-------------|-------|---------|-----------|---------|
| اول | BR-1 | 1/200 | ۶۰ | ۳۰ | ۵۰۰ |
| | BR-2 | 1/250 | ۶۰ | ۳۰ | ۵۰۰ |
| | BR-3 | 1/300 | ۶۰ | ۳۰ | ۵۰۰ |
| دوم | BR-4 | 1/300 | ۶۰ | ۳۰ | ۵۰۰ |
| | BR-5 | 1/300 | ۸۰ | ۳۰ | ۵۰۰ |
| سوم | BR-6 | 1/300 | ۸۰ | ۱۵ | ۵۰۰ |
| | BR-7 | 1/300 | ۸۰ | ۲۰ | ۵۰۰ |

۷-۱- تاثیر انحنای صفحات قوسی

در این بخش تاثیر انحنای صفحات قوسی در رفتار مهاربند پیشنهادی بررسی شده است. مدل‌های مورد مطالعه در این بخش BR1، BR2 و BR3 می‌باشد. منحنی‌های هیستریزس عضو پیشنهادی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که با افزایش انحنای صفحات قوسی ظرفیت نهایی عضو افزایش می‌یابد به صورتی که ظرفیت نهایی نمونه‌های BR1، BR2 و BR3 به ترتیب برابر ۳۹۸، ۸۵۶ و ۱۱۰۵ کیلونیوتن می‌باشد. علاوه بر آن سختی عضو افزایش می‌یابد به طوری که سختی نمونه‌های BR1، BR2 و BR3 به ترتیب برابر ۸۰، ۲۰۰، ۲۴۵ کیلونیوتن بر میلیمتر می‌باشد. همچنین میزان استهلاک انرژی عضو پیشنهادی با افزایش انحنای صفحه قوسی، افزایش می‌یابد. به طوری که میزان استهلاک انرژی به ترتیب ۶/۸۲، ۱۴/۰۷ و ۲۷/۹۱ کیلوژول می‌باشد. در جدول ۵ تاثیر انحنای قوس در رفتار عضو نشان داده شده است.



BR-1

BR-2

BR-3

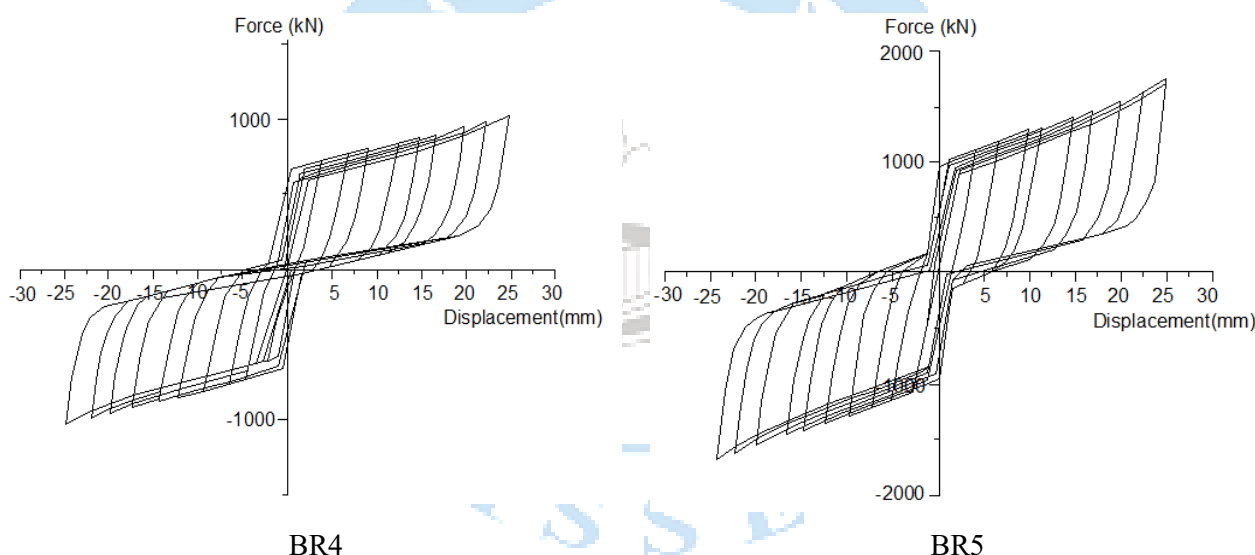
شکل ۱۱: تاثیر انحنای صفحات قوسی در منحنی های هیستریزیس مهاربند پیشنهادی

جدول ۵: تاثیر انحنای صفحات قوسی در رفتار عضو پیشنهادی

| گروه | نام اختصاری | ظرفیت نهایی (kN) | سختی (kN/mm) | استهلاک انرژی (kJ) |
|------|-------------|------------------|--------------|--------------------|
| ۱ | BR-1 | ۳۹۸ | ۸۰ | ۶/۸۲ |
| | BR-2 | ۸۵۶ | ۲۰۰ | ۱۴/۰۷ |
| | BR-3 | ۱۱۰۵ | ۲۴۵ | ۲۷/۹۱ |

۷-۲- تاثیر عرض صفحات قوسی

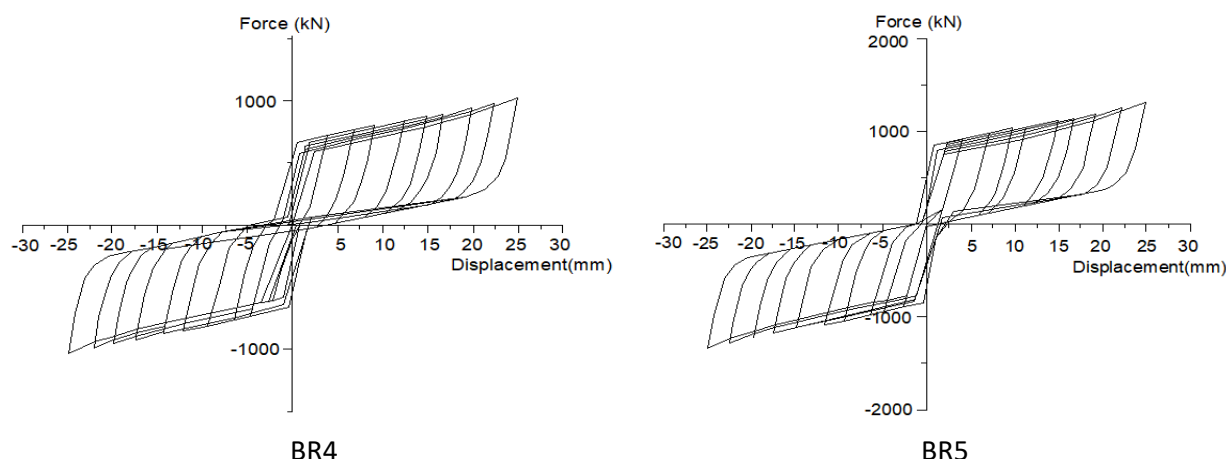
در این بخش به بررسی تاثیر عرض صفحات قوسی در رفتار مهاربند پرداخته می شود. با توجه به نتایج مشاهده می گردد که با افزایش عرض صفحه قوسی، میزان استهلاک انرژی و سختی اولیه عضو افزایش می یابد (شکل ۱۲). برای اطمینان از آنکه عضو وارد محدوده غیرخطی شده و میزان استهلاک انرژی افزایش یابد عرض صفحه قوسی می بایست مناسب انتخاب گردد. مقدار عرض پیشنهادی ۵۰ الی ۸۰ میلیمتر انتخاب گردد.



شکل ۱۲: تاثیر عرض صفحات قوسی در رفتار مهاربند پیشنهادی.

۷-۳- تاثیر ضخامت صفحات قوسی

در این بخش به بررسی تاثیر ضخامت صفحات قوسی پرداخته می شود. بدین منظور دو نمونه با ضخامت های ۱۵ و ۲۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است. هر یک از نمونه ها مدلسازی گردیده و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که پاسخ های هیستریزیس عضو پیشنهادی با افزایش ضخامت صفحات قوسی افزایش ابد (شکل ۱۳). با توجه به نتایج تحلیل مشاهده می گردد که با افزایش ضخامت، قابلیت وارد شدن به ناحیه غیرخطی افزایش می یابد. لازم به ذکر می باشد به منظور اقتصادی بودن طرح مهاربند پیشنهادی ضخامت صفحات قوسی نباید زیاد باشد. در این مطالعه در نظر گرفتن ضخامت ۲۰ میلیمتر مناسب می باشد.



شکل ۱۳: تاثیر ضخامت صفحات قوسی در رفتار مهاربند پیشنهادی.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله به معرفی مهاربند مرکزگرای جدید با صفحات قوسی پرداخته شده است. بدین منظور مهاربند پیشنهادی مورد مدلسازی در نرم افزار آباکوس قرار گرفته و رفتار مهاربند تحت بارگذاری چرخه ای بررسی شده است. مهاربند پیشنهادی در مقایسه با سایر مهاربندها دارای ظرفیت نیروی محوری بالا، استهلاک انرژی قابل توجه، سادگی ساخت متناسب با امکانات موجود در ایران و عدم نیاز به نیروی متخصص می باشد. همچنین از ویژگی های منحصر به فرد مهاربند پیشنهادی می توان به تنظیم سختی و عملکرد مرکزگرایی فنرها با تغییر آرایش فنرها و نیز قابلیت جایگزینی ساده صفحات قوسی بعد از وقوع زلزله اشاره نمود. در این مهاربند خاصیت مرکزی گرایی توسط صفحات قوسی و فنرها می باشد که صفحات قوسی نقش استهلاک انرژی و فنرها نقش مرکزگرایی این دو سیستم را دارد. به منظور استخراج رفتار مهاربند پیشنهادی، در ابتدا اجزای تشکیل دهنده مهاربند پیشنهادی ارائه گردیده و سپس نمونه آزمایشگاهی معرفی می شود. نتایج آزمایشگاهی استخراج گردیده و با نتایج مدلسازی در نرم افزار آباکوس مقایسه گردیده است. همچنین تاثیر پارامترهای مختلف در رفتار مهاربند پیشنهادی مطالعه گردیده است. پارامترهایی که مورد بررسی قرار گرفته شده است شامل عرض، ضخامت و انحنای صفحه قوسی فولادی بررسی شده است. نتایج تحلیل نشان می دهد که:

- (۱) مهاربند مرکزگرای پیشنهادی دارای عملکرد استهلاک انرژی بالا و مرکزگرایی پایدار می باشد که قادر به کاهش تغییر شکل ماندگار بعد از وقوع زلزله می باشد؛
- (۲) با توجه به مدلسازی مهاربند مرکزگرا تغییر شکل ماندگار سیستم بستگی به پیش فشاری اولیه فنرها دارد. تغییر شکل ماندگار سیستم با افزایش پیش فشاری اولیه فنرها کاهش می یابد؛
- (۳) در مهاربند مرکزگرای پیشنهادی صفحات قوسی نقش اصلی در استهلاک انرژی بوسیله تسلیم شدن تغییر شکل خمشی را دارد و فنرها نیز نقش در مرکزگرایی این نوع سیستم را خواهد داشت؛
- (۴) نتایج تحلیل نشان می دهد که مهاربند مرکزگرای پیشنهادی دارای رفتار پرچمی شکل پایداری می باشد؛
- (۵) نتایج مطالعات پارامتری نشان می دهد که با افزایش عرض صفحه قوسی میزان استهلاک انرژی افزایش می یابد و ظرفیت باربری عضو کاهش می یابد. همچنین نتایج تحلیل نشان می دهد که با افزایش ضخامت صفحه فولادی ظرفیت استهلاک انرژی افزایش قابل توجه می یابد. در ضمن نتایج نشان می دهد که وقتی ضخامت صفحه فولادی افزایش می یابد توانایی تغییر شکل الاستیک بیشتر شده و وارد شدن به ناحیه پلاستیک به سختی صورت می گیرد؛
- (۶) نتایج تحلیل نشان می دهد با کاهش انحنای صفحه قوسی فولادی، پاسخ هیستریزس مهاربند که پرچمی شکل می باشد، دارای رفتار چاق بوده و سختی در هر مرحله نسبتاً نرم و ملایم است.

مراجع

1. O'Reilly, G.J., J. Goggins, and S.A. Mahin. *Behaviour and design of a self-centering concentrically braced steel frame system*. in *15th World Conference on Earthquake Engineering*. 2012. Lisbon, Portugal.
2. O'Reilly, G.J., J. Goggins, and S.A. Mahin. *Performance-based design of a self-centering concentrically braced frame using the direct displacement-based design procedure*. in *15th World Conference on Earthquake Engineering*. 2012. Lisbon, Portugal.
3. Cheng, C.-T., C.-H. Hsu, and K.-C. Lin. *Seismic behavior of self-centering designed eccentrically braced frames*. in *15th World Conference on Earthquake Engineering*. 2012. Lisbon, Portugal.
4. Miller, D.J., *Development and experimental validation of self-centering buckling-restrained braces with shape memory alloy*. 2011, University of Illinois at Urbana-Champaign: Urbana, Illinois.
5. Miller, D.J., L.A. Fahnestock, and M.R. Eatherton, *Development and experimental validation of a nickel-titanium shape memory alloy self-centering buckling-restrained brace*. *Engineering Structures*, 2012. **40**: p. 288-298.
6. Braconi, A., F. Morelli, and W. Salvatore, *Development, design and experimental validation of a steel self-centering device (SSCD) for seismic protection of buildings*. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2012. **10**(6): p. 1915-1941.
7. Bruneau, M. *Emerging Hysteretic-Based Seismic Systems: Convergence of Ideas in Ductile Steel Design*. in *10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations Control of Structures*. 2007. Istanbul, Turkey.
8. Eatherton, M., et al. *Hybrid Simulation Testing of a Controlled Rocking Steel Braced Frame System*. in *9th National Conference on Earthquake Engineering*. 2010. Toronto, Canada.
9. Ma, X., et al. *Seismic Design and Behavior of Steel Frames with Controlled Rocking – Part II: Large Scale Shake Table Testing and System Collapse Analysis*. in *ASCE/SEI Structures Congress*. 2010. Orlando, Florida.
10. Chi, P., et al., *Parametric Study on the Seismic Response of Steel-Framed Buildings with Self-Centering Tension-Only Braces*. *Advances in Civil Engineering*, 2019. **2019**.
11. Rahgozar, N., A.S. Moghadam, and A. Aziminejad, *Quantification of seismic performance factors for self-centering controlled rocking special concentrically braced frame*. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2016. **25**(14): p. 700-723.
- 12.
13. Grigorian, M., M. Farshbaf, and S. Dehghanian, *Innovations in Sustainable Earthquake Resisting Rocking Wall-Frames*. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 2018. **6**(2): p. 1-19.
14. Xie, Q., Z. Zhou, and S.-P. Meng, *Experimental investigation of the hysteretic performance of self-centering buckling-restrained braces with friction fuses*. *Engineering Structures*, 2020. **203**: p. 109865.
15. Guo, T., et al., *Self-centering cable brace with friction devices for enhancing seismic performance of RC frame structures*. *Engineering Structures*, 2020. **207**: p. 110187.
16. Xu, L., S. Yao, and Y. Sun, *Development and validation tests of an assembly self-centering energy dissipation brace*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019. **116**: p. 120-129.
- 17.
18. Mohammadi, M. and n. afkaneh, *On the seismic performance of a New low damage Structure; Moment Resisting Frame with Post-Tensioned Connections and Frictional Braces*. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2022. **9**(7): p. 65-85.
19. Bavandi, M., et al., *Development of efficiency index for steel moment frames with Self-Centering Connections*. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2021. **8**(1): p. 62-81.
20. Yousef-beik, S.M.M., et al., *A new self-centering brace with zero secondary stiffness using elastic buckling*. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020. **169**: p. 106035.
21. Xu, L.-H., X.-S. Xie, and Z.-X. Li, *A self-centering brace with superior energy dissipation capability: development and experimental study*. *Smart Materials and Structures*, 2018. **27**(9): p. 095017.