

بررسی عملکرد چرخه‌یی سیستم نوین قاب با مهاربند لوزی شکل مجهز به میراگر تسلیم‌شونده‌ی حلقوی

قاسم باجیده (دکتری)

محمدعلی کافی (دانشیار)

مجید قلعه‌کی* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شهریه، بهار (۱۴۰۰)
دوری ۲ - ۳۷، شماره ۱/۱، ص. ۱۱۷-۱۳۰

در نوشتار حاضر، به معرفی و بررسی عملکرد لرزه‌یی سیستم نوین مهاربندی پرداخته شده است، که از یک عضو مهاربند لوزی شکل به همراه میراگر تسلیم‌شونده‌ی حلقوی تشکیل شده است، که به صورت غیرمستقیم با یکدیگر عمل می‌کنند. پس از ساخت نمونه‌ها، یک مهاربند لوزی شکل با اتصال‌های مفصلی و حلقه‌های با ضخامت‌های مختلف و یک مهاربند با اتصال‌های مفصلی و المان لینک درون یک قاب مدل‌سازی شدند. نتایج حاکی از آن است که حضور حلقه‌ی فولادی به عنوان یگانه عضو تسلیم‌شونده در سیستم قاب با مهاربندی لوزی (باقی اعضا در حالت کشسان رفتار می‌کنند)، سبب ایجاد ظرفیت باربری در مهاربند تا حدود ۹ برابر ظرفیت حلقه و ۷۵٪ ظرفیت مهاربند هم‌محور می‌شود. همچنین ظرفیت جذب انرژی سیستم با مهاربند لوزی با وجود حلقه، تا حدود ۴۵٪ بیشتر از مهاربند هم‌محور است.

واژگان کلیدی: سیستم نوین قاب با مهاربند لوزی شکل، میراگر تسلیم‌شونده‌ی حلقوی، المان لینک، مهاربند هم‌محور، بار چرخه‌یی.

ghpachideh@semnan.ac.ir
mkafi@semnan.ac.ir
mgholhaki@semnan.ac.ir

۱. مقدمه

مطالعات بسیاری طی دو دهه‌ی اخیر بر روی افزایش شکل‌پذیری مهاربندهای هم‌محور انجام شده است. علی‌رغم برخی مزایا، مانند سهولت اجرا و بازسازی، تغییرمکان نهایی آنها باعث نگرانی در مورد کاربردشان شده است. علاوه بر این، محدودیت شکل‌پذیری مهاربندهای هم‌محور، باعث عملکرد ضعیف آنها در برابر زلزله شده است.^[۱] مطالعات گوناگونی مانند استفاده از یک المان دایره‌یی با مواد هائیرکشسان در قاب خمشی با مهاربندی به جهت افزایش خاصیت شکل‌پذیری انجام شده است.^[۲] با این حال، بیشتر روش‌های ذکر شده، به مواد خاص و تکنولوژی برای اجرای مهاربندها احتیاج دارند. بنابراین استفاده از حلقه‌ی فولادی یا اعضا شکل‌پذیر دیگر، به عنوان فیوز کنترلی برای حل مشکلات اشاره شده، پیشنهاد شده است.^[۳] که سبب بهبود شکل‌پذیری و خاصیت جذب انرژی سیستم می‌شود.^[۴-۶] اولین مطالعات در زمینه‌ی میراگرهای فولادی توسط کلی^۱ و همکاران انجام شده است.^[۷] ایشان در سال ۱۹۷۲،^[۸] استفاده از میراگرهای فولادی را برای بیان هدف از اتلاف انرژی لرزه‌یی در یک سیستم سازه‌یی معرفی کرده‌اند. همچنین ایشان عملکرد سه عدد از میراگرهای ذکر شده را که شامل تغییرشکل‌های پیچشی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۴/۶، اصلاحیه ۱۳۹۹/۴/۱۵، پذیرش ۱۳۹۹/۵/۱۹.

DOI:10.24200/J30.2020.55973.2794

و خمشی فولاد می‌شود، دقیقاً بررسی کرده‌اند. تأکید در مطالعات اخیر بر روی آزمایش قطعه‌یی بوده است. میراگرها برای تعیین پاسخ سیکلی نیرو - جابه‌جایی و عمر مربوط به خستگی آزمایش شدند. روابط تحلیلی نیز در یک مطالعه‌ی اولیه برای کمی‌سازی رفتار توسعه داده شده است. چن و آلبرمانی^۲ (۲۰۰۸)، با انجام پژوهشی در ارتباط با سیستم جدید جاذب انرژی در ساختمان‌های فولادی، عملکرد سیستم جاذب انرژی از طریق ۹ آزمایش را مطالعه کردند و دریافتند که سیستم جاذب انرژی معرفی شده، شکل‌پذیری و جذب انرژی خوبی دارد. کافی^۳ (۲۰۰۸)، نیز با استفاده از حلقه‌ی فولادی در مهاربندهای هم‌محور و یا به عبارتی در اعضا محوری، در بررسی آزمایشگاهی و عددی سیستم مهاربندی دریافتند که از مزایای قابل توجه به کارگیری حلقه‌ها، بهبود رفتار سازه است.^[۴] از دیگر روش‌هایی که به منظور افزایش شکل‌پذیری مهاربندهای ضربدری مطالعه شده است، استفاده از یک قاب انعطاف‌پذیر است، که به جای صفحه‌ی فولادی میانی، در محل تلاقی مهاربندها تعبیه می‌شود. قاب فولادی مذکور با اتصال‌های صلب، متأثر از نیروهای کششی و فشاری مهاربند، تغییرشکل می‌دهد و در گوشه‌های آن مفاصل خمیری تشکیل می‌شوند. تغییرشکل غیرکشسان قاب موجب می‌شود که بخشی از انرژی زلزله توسط آن جذب شود و در نتیجه، شکل‌پذیری مهاربند افزایش یابد. راکچیویچ و جوروکوشی^۴ (۱۹۹۸)^[۵] و روفه‌گری نژاد و صبوری^۵ (۲۰۰۲)،^[۶] با استفاده از

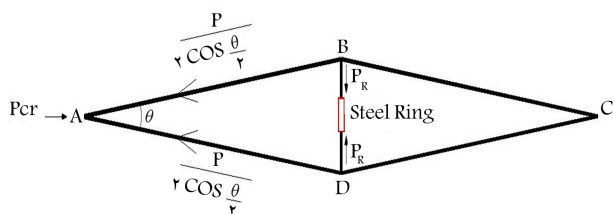
- رسیدن به ظرفیت‌های زیاد به کمک حلقه‌ی فولادی با ظرفیت چندین برابر کمتر،
- قابلیت تعویض‌پذیری المان شکل‌پذیر،
- رسیدن به شکل‌پذیری و جذب انرژی قابل قبول،
- ارائه‌ی سیستمی به عنوان جایگزین سایر سیستم‌های موجود،
- مقایسه و بررسی محاسن و معایب سیستم پیشنهادی با سایر سیستم‌های مشابه.

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

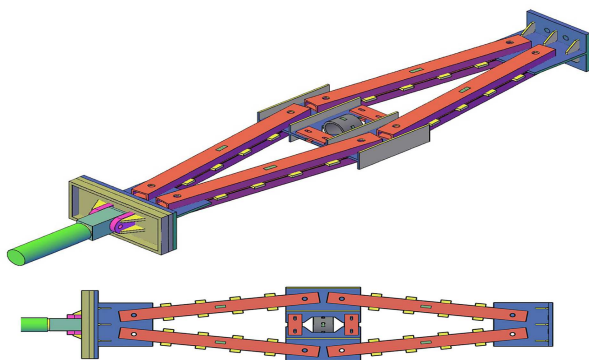
۱.۲. معرفی سیستم پیشنهادی

سیستم پیشنهادی ارائه شده در نوشتار حاضر فقط منحصر به استفاده از یک حلقه‌ی فولادی به عنوان یک میراگر نمی‌شود. لذا هر المان یا ساختاری که بتواند نقش جاذب انرژی و تأمین شکل‌پذیری را ایفا کند (حلقه، فنر، میراگر، المان‌های ترکیبی و ...)، می‌تواند در سیستم پیشنهادی ارائه شده به خوبی نقش خود را ایفا کند. لذا با توجه به سهولت دسترسی و ارزان بودن استفاده از حلقه‌ی فولادی و به نوعی مقایسه با کارهای مشابه انجام شده، حلقه‌ی فولادی با مشخصات مورد نظر تهیه و آماده‌سازی شد. در شکل ۱، تصویر کلی سیستم پیشنهادی مشاهده می‌شود.

سیستم پیشنهادی بدین صورت است که عضو مهاربند به صورت لوزی شکل مطابق شکل ۲ بوده است، که در وسط آن میراگر تسلیم‌شونده‌ی حلقوی قرار گرفته است. ترکیب سیستم اخیر به گونه‌ی است که عضو مهاربند و میراگر به صورت موازی (غیرمستقیم) با یکدیگر عمل کنند. بدین معنی که ظرفیت نهایی سیستم مهاربندی، ارتباط مستقیم با میراگر ندارد و از میراگری با ظرفیت مشخص، می‌توان سیستمی با ظرفیت چندین برابر ارائه داد، که این مطلب به راحتی با روابط استاتیک و مقاومت مصالح قابل اثبات است روابط ۱ و ۲ یک سمت مهاربند به قاب آزمایشگاه فیکس و بارگذاری از سمت دیگر آن اعمال شده است. هنگامی که جک آزمایشگاه نیروی فشاری اعمال می‌کند، قطر کوچک لوزی باز می‌شود، بنابراین حلقه کشیده می‌شود.



شکل ۱. هندسه‌ی کلی سیستم پیشنهادی.

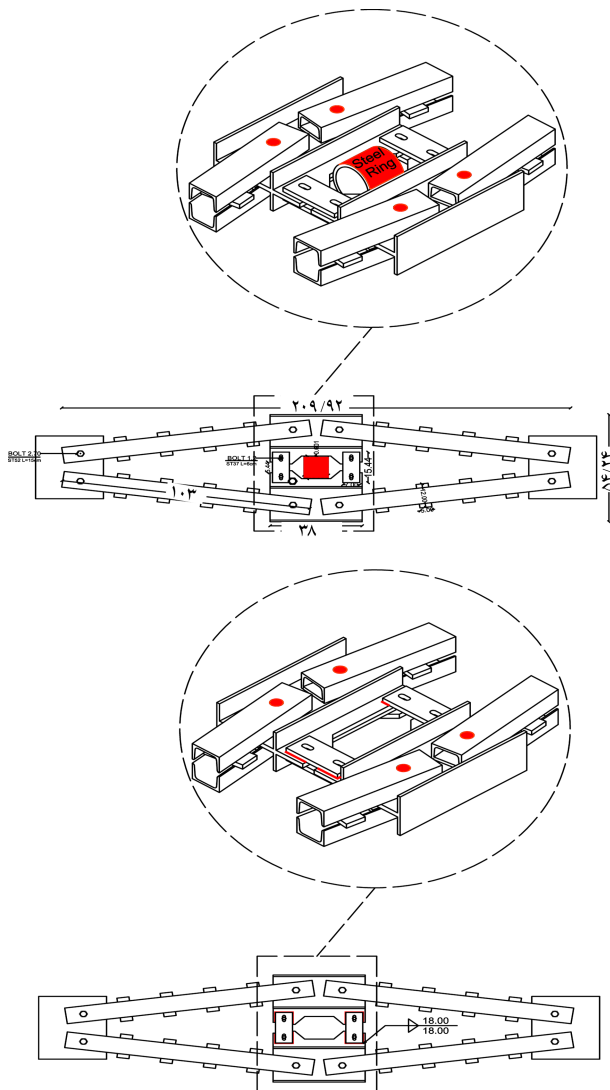


شکل ۲. نمای شماتیک سیستم پیشنهادی.

روش اخیر، مطالعاتی را به منظور بررسی عملکرد قاب میانی انجام داده‌اند. ابعاد قاب میانی در میزان سختی قاب تأثیر مستقیم داشته و افزایش ابعاد آن، موجب کاهش سختی آن شده است. معتمدی و همکاران (۲۰۱۲)^[۱۷] و پنگ^۶ و همکاران (۲۰۱۸)^[۱۸] نیز در بررسی منحنی هیستریزس حلقه‌ی فولادی، که به عنوان فیوز عمل می‌کند، دریافتند که حلقه‌ی انتخاب شده در شکل‌پذیری و جذب انرژی قاب، عملکرد بسیار مناسبی دارد. بزاز^۷ و همکاران و همچنین عندلیب^۸ و همکاران طی سال‌های ۲۰۱۲ الی ۲۰۱۵^[۱۹-۲۳] به بررسی رفتار لرزه‌یی قاب فولادی با مهاربند دروازه‌یی که المان شکل‌پذیر حلقه در آن به کار رفته است، پرداختند و دریافتند که استفاده از حلقه در مهاربند، باعث بهبود شکل‌پذیری و جذب انرژی قاب می‌شود. ژائو^۹ و همکاران (۲۰۱۶)، نیز به ارائه‌ی یک سیستم مهاربند نوین با استفاده از قرار دادن حلقه‌یی از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SMA) در محل تلاقی مهاربند محور پرداختند و دریافتند که استفاده از سیستم اخیر سبب بهبود شکل‌پذیری و خاصیت استهلاک انرژی می‌شود.^[۲۴] همچنین عندلیب و همکاران (۲۰۱۸)^[۲۵] به مطالعه‌ی عددی شکل‌پذیری و جذب انرژی حلقه‌های فولادی ساخته شده (دو نیم حلقه) با صفحات انتهایی پرداختند و آثار جوش، پیچ، ضخامت حلقه و خواص مواد در شکل‌پذیری و جذب انرژی را بررسی کردند و نتایج ایشان، نشان از عملکرد مناسب حلقه‌ها داشت. پنگ و همکاران (۲۰۱۹)^[۲۶] نیز در بررسی لرزه‌یی رفتار قاب فولادی با مهاربند شورون حاوی حلقه‌ی فولادی دریافتند که استفاده از حلقه‌ی فولادی در مهاربند شورون، سبب بهبود جذب انرژی و شکل‌پذیری سیستم می‌شود.^[۲۶] همچنین خیرالدین^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۹)، در بررسی آزمایشگاهی مقاوم‌سازی قاب بتن مسلح با جکت فولادی و با مهاربند فولادی X شکل و مهاربند فولادی X شکل حاوی حلقه‌ی فولادی، بر روی تمامی نمونه‌ها بارگذاری چرخه‌یی را اعمال کردند و دریافتند که استفاده از مهاربند X شکل (چه با حلقه و چه بدون حلقه) در قاب بتن مسلح، سبب بهبود مقاومت و سختی سیستم نسبت به حالتی شده است، که فقط قاب باشد. اما به طور کلی علی‌رغم اندکی کاهش در مقاومت، میزان جذب انرژی و شکل‌پذیری سیستم با حلقه نسبت به سیستم مهاربندی بدون حلقه بیشتر بوده است.^[۲۷]

با بررسی مطالعات اخیر در زمینه‌ی استفاده از سیستم فیوز در مهاربندها، از جمله استفاده از حلقه‌ی فولادی، مشخص شد که عمده‌ی مطالعات و پژوهش‌ها بدین شکل بوده است که حلقه‌ی جاسازی شده در درون مهاربند، عملکردی سری داشته و ظرفیت نهایی و شکل‌پذیری سیستم مستقیماً وابسته به ظرفیت حلقه بوده است. بنابراین در صورت احتیاج به ظرفیت‌های بالا، باید از حلقه‌یی بزرگ‌تر و ضخیم‌تر استفاده کرد تا بتوان نیازهای طراحی و اجرا را تأمین کرد. بنابراین، در نوشتار حاضر، سیستم نوینی ارائه شده است، که ضمن معرفی یک سیستم مهاربندی جدید با قابلیت تعمیرپذیری، ظرفیت کلی مهاربند مستقیماً وابسته به ظرفیت حلقه نباشد و با عملکردی موازی بتواند از حلقه‌یی با ظرفیت مشخص، ظرفیت نهایی چندین برابر را برای مهاربند تعبیه کند. بدین منظور با انجام یک برنامه‌ی آزمایشگاهی مشخص، نتایج آن به کمک نرم‌افزار آباکوس^{۱۱} صحت‌سنجی شده است. سپس ۳ قاب با مهاربندهای ساده (قطری)، لوزی شکل بدون المان لینک (مدل نیمه صلب) و لوزی شکل با حلقه (مدل مفصلی) در مقیاس واقعی مدل‌سازی و تحلیل شده و پارامترهای حاصل از تحلیل چرخه‌یی به صورت کیفی و کمی در قالب نمودارها و کانتورهای تنش (نرم‌افزار آباکوس) با یکدیگر ارزیابی و مقایسه شده‌اند. بنابراین مهم‌ترین اهداف نوشتار حاضر عبارت‌اند از:

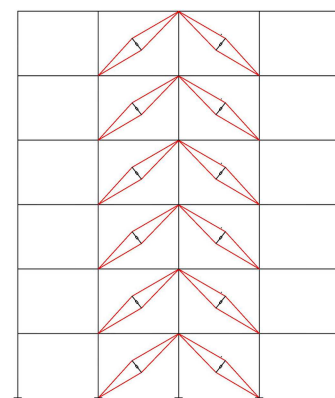
- ارائه‌ی سیستم نوین مهاربندی با قابلیت اجرای ساده و عملکرد صحیح،



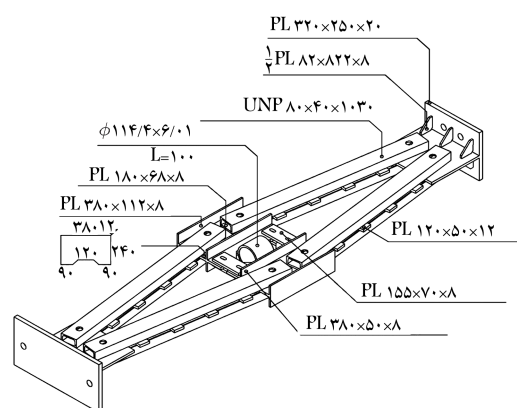
شکل ۵. تفاوت مدل مفصلی (تصویر بالا) و نیمه صلب (تصویر پایین).

شامل ورق ناودانی، صفحات فولادی، پیچ و مهره و حلقه فولادی است. تفاوت مدل مفصلی و نیمه صلب در وجود و یا عدم وجود حلقه (وجود المان لینک) در سیستم است. در مدل مفصلی، تمامی اتصالات اعضای مهاربندی (ناودانی‌ها) به صورت پیچ و مهره از نوع اتکایی بوده و حلقه‌ی تسلیم‌شونده در وسط مهاربند، با جوش به ورق‌های اطراف متصل شده است. در مدل نیمه صلب نیز اتصالات‌های ناودانی همانند اتصال مفصلی است، با این تفاوت که حلقه‌ی فولادی در سیستم استفاده نشده و به جای آن اتصال ۴ ورق متصل‌کننده (دو ورق میانی با ۴ ورق ۳ میلی‌متری به یکدیگر متصل شده‌اند) سیستم به صورت جوش سرتاسری بوده است. شکل ۵، برای نمایش هر چه بهتر تفاوت مدل‌ها ارائه شده است. همچنین در شکل ۶ نیز نمونه‌ی ساخته شده‌ی یکی از مدل‌ها مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که محل جانمایی، قطر و مشخصات پیچ‌ها مطابق دستورالعمل AISC ۳۵۸-۱۶^[۲۸] تعیین شده‌اند. تمامی پیچ و مهره‌های به کار رفته با نمره ۲۷، طول ۱۵ سانتی‌متر و رده‌ی مقاومتی ۱۰/۹ به صورت فورج سرد تولید و استفاده شده‌اند.

نکته‌ی قابل تأمل در مدل‌های مذکور، ایجاد زاویه‌ی کم (۱۵/۶ درجه) بین عضو لوزی شکل است. در این طرح تلاش شده است تا با در نظر گرفتن شرایط



شکل ۳. نحوه‌ی جانمایی مهاربند لوزی شکل پیشنهادی در قاب.



شکل ۴. مشخصات ابعادی قطعات به کار رفته در مهاربند (میلی‌متر).

در حالتی که جک آزمایشگاه نیروی کششی اعمال می‌کند، حلقه تحت فشار قرار می‌گیرد. بدین ترتیب عملاً عضو باربر سیستم پیشنهادی، حلقه (به عنوان عضو تسلیم‌شونده) است و بقیه‌ی اعضای در حالت کشسان کار می‌کنند.

$$P_R = \frac{t^2 \cdot L}{R} \sigma \quad (۱)$$

ظرفیت حلقه^[۱۲]

$$P_{cr} = \frac{P_R}{\tan \frac{\theta}{2}} \quad (۲)$$

ظرفیت مهاربند

که در رابطه‌ی ۱، t ، L و R به ترتیب عبارت‌اند از: ضخامت حلقه، طول حلقه و شعاع متوسط حلقه. همچنین σ برابر است با تنش فولاد استفاده شده در حلقه، که برای داده‌های آزمایشگاهی باید از مقدار تنش تسلیم (σ_y) استفاده کرد و برای نرم‌افزار از مقدار تنش نهایی (σ_u).

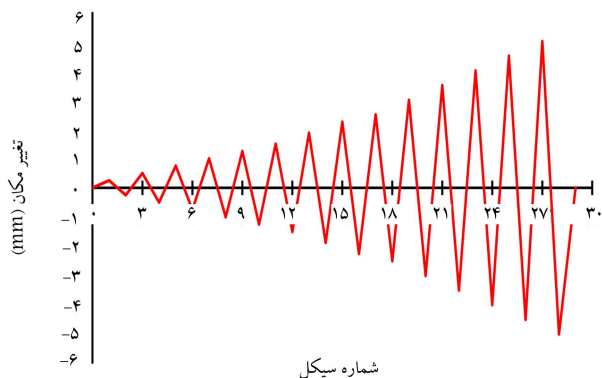
همچنین نحوه‌ی جانمایی مهاربند پیشنهادی در شکل ۳ مشاهده می‌شود، که مطابق آن مهاربند مورد نظر به صورت هم‌محور در دو دهانه با عملکرد کششی - فشاری رفتار می‌کند.

۲.۲. جزئیات برپایی آزمایش

در مطالعه‌ی حاضر سه نوع مهاربند با انواع اتصالات مفصلی کامل و نیمه صلب و مهاربند ساده (هم‌محور) تحت آزمایش چرخه‌ی قرار گرفته‌اند. چون مهاربند با اتصالات‌های صلب کامل (جوشی) قابلیت اجرایی ندارد و عملاً عملکردی از خود نشان نمی‌دهد، بررسی نشده است. اتصالات، جزئیات هندسی و ابعاد تمامی اجزاء مهاربند لوزی در شکل ۴ مشاهده می‌شود. اعضای تشکیل‌دهنده‌ی سیستم مذکور

جدول ۱. آزمایش کشش بر روی فولادهای مصرفی.

نوع ماده	کرنش شکست (%)		تنش تسلیم (مگاپاسکال)		تنش شکست (مگاپاسکال)	
	استاندارد	آزمایش	استاندارد	آزمایش	استاندارد	آزمایش
ورق ناودانی	۲۴<	۴۰	۲۲۵<	۲۴۵	۵۱۰-۳۴۰	۳۴۹
ضخامت فولادی	۲۲<	۲۹	۳۴۵<	۳۶۵	۶۳۰-۴۷۰	۵۷۱



شکل ۷. بارگذاری چرخشی استفاده شده در آزمایش‌ها.

آمده در جدول ۱ ارائه شده‌اند، که این مقادیر علاوه بر شناخت دقیق رفتار مواد به کار رفته در ساخت نمونه‌ها، در معرفی مشخصات مصالح در نرم‌افزار نیز به کار خواهد آمد. استاندارد آزمون ورق ناودانی و صفحات فولادی به ترتیب عبارت‌اند از: BS EN ۱۰۰۲۵-۲ Grade ۲۳۵J۲ و BS EN ۱۰۰۲۵-۲ Grade S ۳۳۵J۲ و BS ۱۰۰۲۵-۲ BN. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تمامی مشخصات مواد به کار رفته در ساخت مهاربند در محدوده استاندارد قرار دارند.

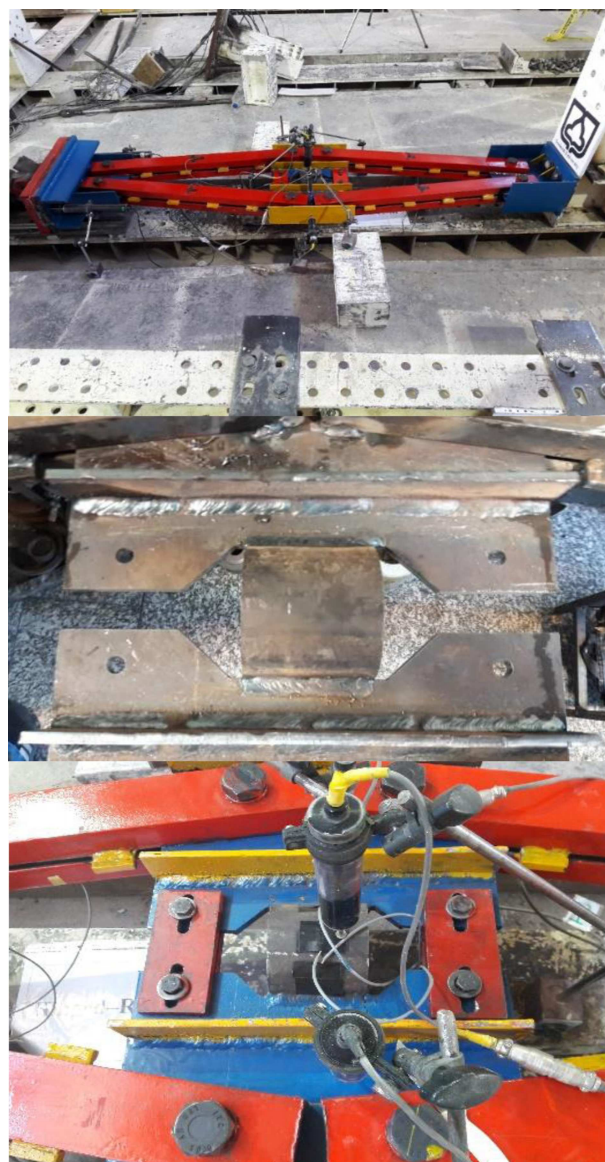
۳.۲. بارگذاری

بارگذاری استفاده شده در پژوهش حاضر، بارگذاری چرخشی مطابق با آیین‌نامه‌ی ATC-۲۴^[۲۹] بوده است، که در شکل ۷ مشاهده می‌شود. بارگذاری تا چرخه‌ی سی‌ام و تغییرمکان ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است، که سیستم مورد نظر تا تغییرمکان حدود ۵/۵ میلی‌متر تسلیم می‌شود، اما بارگذاری از تغییرمکان ۲۵/۰ میلی‌متر آغاز شده است. همچنین تا چرخه‌ی پانزدهم به صورت ۳ سیکل و از آن به بعد به صورت ۲ سیکل ادامه یافته است.

۳. صحت‌سنجی نمونه‌ی آزمایشگاهی

به منظور حصول اطمینان از نتایج مدل‌سازی عددی، نمونه‌ی آزمایشگاهی لوزی با اتصال مفصلی و با مشخصات ذکر شده در قسمت‌های قبل، در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و تحت بار چرخشی قرار گرفته است. حلقه‌ی استفاده شده به قطر خارجی، طول و ضخامت به ترتیب ۱۱/۴۳، ۱۰ و ۶/۶۰۱ سانتی‌متر بوده است، که مشخصات مصالح آن مشابه مصالح استفاده شده در پژوهش کافی (۲۰۰۸)^[۱۴] است.

به منظور مدل‌سازی اعضاء مختلف مدل برای بخش عضو مهاربندی و ورق‌های اتصال از المان Solid و برای مدل‌سازی لوله و ورق اتصال دوری از المان Shell استفاده شده است. همچنین شرایط مرزی و بارگذاری به طور کلی تعیین‌کننده‌ی تکیه‌گاه‌های مدل، تقارن، تغییرمکان‌ها و نیروهای اعمالی به مدل است. نیروی اعمالی



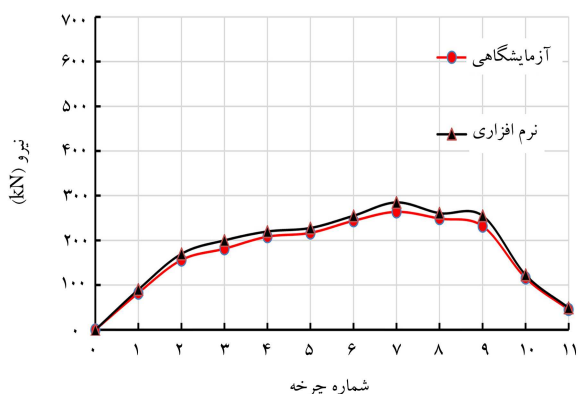
شکل ۶. نمای کلی مهاربند پیشنهادی پس از ساخت.

آیین‌نامه‌ی، آزمایشگاهی و محدودیت‌های انجام آزمون، نمونه‌ی ساخته شده که تا حد امکان به لحاظ ظاهری و عملکردی نزدیک به یک مهاربند هم‌محور باشد. اما می‌توان در مطالعات آینده، عملکرد آن را با زوایای مختلف نیز بررسی کرد. دقت شود که افزایش در مقدار زاویه‌ی لوزی، سبب کاهش ظرفیت مهاربند می‌شود، که در این خصوص باید ظرفیت جک بارگذاری و اهداف پژوهش را نیز مدنظر قرار داد.

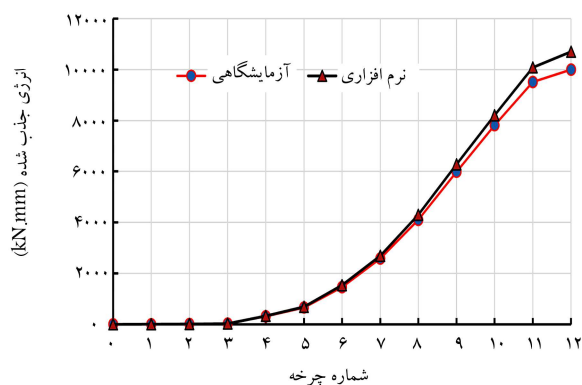
همچنین با توجه به آزمایش کشش انجام شده بر روی ورق‌های ناودانی و صفحات در آزمایشگاه مهندسی مواد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پارامترهای به دست

جدول ۳. مقایسه‌ی نتایج ظرفیت باربری سیستم مهاربندی لوزی شکل (تن).

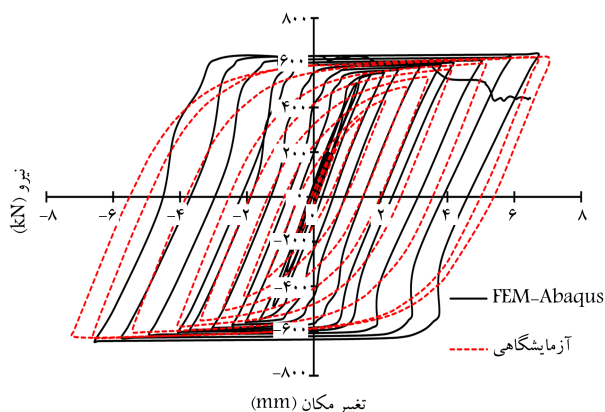
تحلیلی	نرم افزاری	آزمایشگاهی
۲۸/۵	۲۷/۴	۲۶/۴



شکل ۹. منحنی نیرو - چرخه در مدل مفصلی.

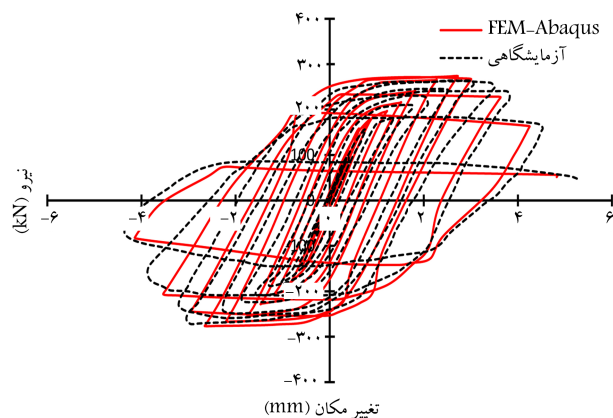


شکل ۱۰. منحنی انرژی جذب شده - چرخه در مدل مفصلی.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی مهاربند با اتصال‌های نیمه‌صلب.

آزمایشگاهی و عددی دارند. بنابراین یکی از مزایای سیستم پیشنهادی این است که می‌توان با داشتن ظرفیت حلقه، ظرفیت کلی سیستم را به راحتی تخمین زد. همچنین منحنی‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزاری (عددی): نیرو - چرخه و انرژی جذب شده - چرخه در مدل مفصلی، در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده‌اند. در ادامه، در شکل ۱۱، نیز صحت‌سنجی نمونه‌ی دیگر سیستم پیشنهادی ارائه شده است، که همچون نمونه‌ی مفصلی، نمونه‌ی نیمه‌صلب نیز با دقت مناسبی در



شکل ۱۲. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی مهاربند با اتصال‌های مفصلی.

جدول ۲. مقایسه‌ی کمی نتایج آزمایشگاهی و عددی مدل مفصلی.

اختلاف (%)	عدد	آزمایشگاهی
پیشینه‌ی بار (kN)	۲۶۴	۲۷۳/۹
پیشینه‌ی تغییر مکان (mm)	۵/۳	۴/۹
جذب انرژی (kN.mm)	۹۹۳۹/۴	۹۳۱۸/۹
سختی کل (kN/mm)	۵۷/۵	۶۰/۲

به مدل به صورت کنترل تغییر مکان و پروتکل بارگذاری اعمالی نیز مشابه نمونه‌ی آزمایشگاهی با پروتکل بارگذاری بر حسب ATC-۲۴ بوده است. المان در نظر گرفته شده به منظور مش‌بندی نیز نمونه‌ی المان C3DAR بوده است، که یک المان مکعبی سه‌بعدی ۸ گرهی با سختی کاهش یافته است. برای بخش‌های با المان Shell نیز از المان S4R استفاده شده است. در شکل ۸، منحنی‌های هیستریزس نتایج آزمایشگاهی و عددی مشاهده می‌شود. مقایسه‌ی کمی بین نتایج جدول ۲، نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب مدل عددی است.

همچنین به کمک روابط ۱ و ۲، عملکرد نرم‌افزار بررسی شده است، که در رابطه‌ی ۳ ارائه شده است.

حلقه‌یی که در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد، به طول، ضخامت و شعاع متوسط ۱۰۰، ۶/۰۱ و ۵۴/۱۴۵ میلی‌متر و تنش نهایی ۵۸۵ مگاپاسکال است. بنابراین ظرفیت حلقه به صورت رابطه‌ی ۳ محاسبه شده است:

$$P_R = \frac{t^2 \cdot L}{R} \sigma_u = \frac{6.01^2 \times 100}{54.145} \times 585$$

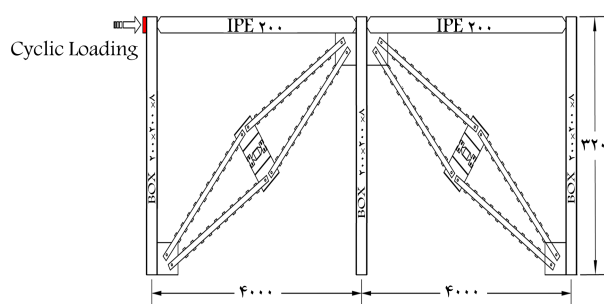
$$= 39025 N \cong 39 kN$$

$$= 3.9 ton \quad (3)$$

با توجه به سیستم پیشنهاد شده در نوشتار حاضر و رابطه‌ی حاصل از آن رابطه‌ی ۲، ظرفیت کلی مهاربند مطابق رابطه‌ی ۴ به دست آمده است:

$$P_{cr} = \frac{P_R}{\tan \theta} = \frac{3.9}{\tan \frac{15.6}{4}} = 28.5 ton \quad (4)$$

بنابراین با توجه به نتایج حاصل از ظرفیت باربری سیستم به صورت آزمایشگاهی، عددی، و تحلیلی، می‌توان نتایج مذکور را به صورت جدول ۳ جمع‌بندی کرد: مطابق جدول ۳ ملاحظه می‌شود که نتایج تحلیلی، اختلاف بسیار اندکی با نتایج



شکل ۱۴. نمای کلی قاب و مهاربند لوزی.

مقارن داشته باشند. در سیستم اول، مدل مهاربند لوزی شکل با اتصال مفصلی و در سیستم دوم، مدل مهاربند لوزی شکل با اتصال نیمه صلب و در سیستم سوم، مدل مهاربند ساده استفاده شده است. نکته‌ی قابل توجه در تمامی قاب‌های مهاربندی، سطح مقطع و ممان اینرسی خارج از صفحه‌ی برابر در هر سه نوع مهاربند است. نمای کلی قاب و مهاربند لوزی استفاده شده در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. اعضاء تیر و ستون در هر سه مدل با یکدیگر برابر بودند و رفتارشان در تمام اتصالات به صورت مفصلی بوده است. برای ستون‌ها از پروفیل $200 \times 200 \times 8$ Box و برای تیرها از IPE 200 استفاده شده است. مهاربندها با ورق گاست با ابعاد $400 \times 400 \times 10$ PL به ستون متصل شده‌اند. برای اتصال مهاربندها با گاست از پین با قطر ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. طراحی قاب‌ها بدین صورت بوده است که با توجه به ظرفیت بالاتر سیستم با مهاربند ساده نسبت به سایر سیستم‌ها، مقاطع تیرها و ستون‌ها برای مهاربند مذکور چنان طراحی شده است، که پس از بارگذاری، اعضاء تیرها و ستون‌ها همچنان در مرحله‌ی کشسان باقی بمانند و فقط مهاربند دچار کمزش شود. پس از حصول اعضاء اصلی قاب، سیستم‌های با مهاربند لوزی شکل با اتصالات مفصلی و نیمه صلب نیز با همان مقاطع مدل‌سازی شدند. ذکر این نکته لازم است که نتایجی که از قاب‌های ذکر شده حاصل شده است، فقط مختص پارامترهای لحاظ شده در مدل‌های اشاره شده بوده و برای بررسی در سازه‌های چند طبقه، نیاز به بررسی بیشتر در خصوص سازه‌های مذکور است.

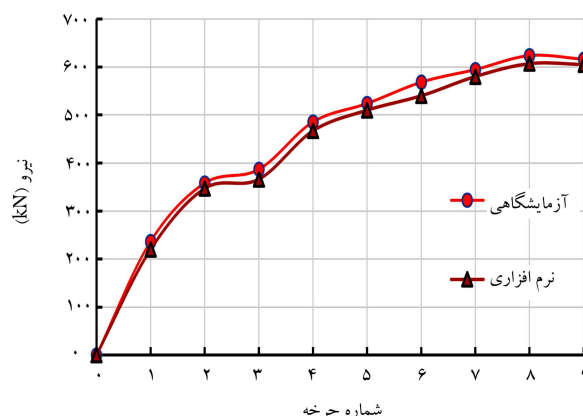
۵. مدل‌سازی عددی

با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی و شرایط آزمون، مهاربندها با مقیاس ساخته و آزمایش شدند. برای انجام مدل‌سازی و تحلیل در نرم‌افزار آباکوس، باید نمونه‌ها با مقیاس واقعی بررسی شوند. با توجه به این‌که در سیستم مهاربندی پیشنهادی، چند عامل مختلف، از جمله: زاویه‌ی مهاربند، مشخصات هندسی حلقه، ابعاد دهانه‌ی مهاربند و ... در میزان شکل‌پذیری، جذب انرژی و ظرفیت سیستم مؤثر هستند، لذا نمی‌توان تمامی این موارد را در یک نوشتار از همه‌ی جوانب بررسی کرد. اما با وجود این، یک معیار مشخص برای به مقیاس واقعی درآوردن مهاربندها در نظر گرفته شده است؛ به طوری که با افزایش طول مهاربند، زاویه‌ی مهاربند تغییر نکند و همچنین از همان حلقه‌ی استفاده شده، که در محیط آزمایشگاه استفاده شده است.

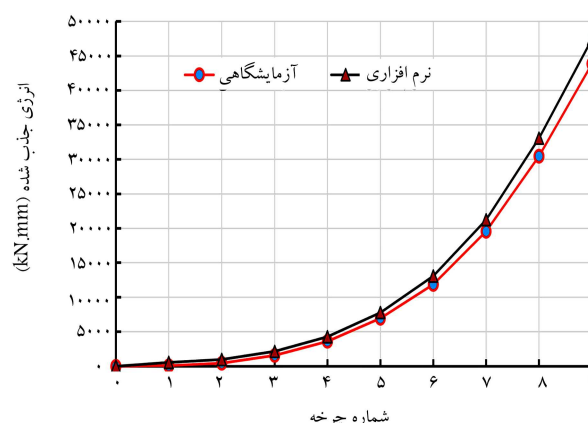
به منظور مقایسه و درک بهتر رفتار مهاربندهای لوزی در قاب، یک نمونه قاب با مهاربند ساده نیز مدل‌سازی شده است، که سطح مقطع و ممان اینرسی خارج از صفحه‌ی آن، با مدل‌های لوزی برابر است (شکل ۱۵). بنابراین، مشخصات هندسی و متراپی مدل‌های نیمه صلب و قطری نیز مشابه مدل مفصلی است، با این تفاوت

جدول ۴. مقایسه‌ی کمی نتایج آزمایشگاهی و عددی مدل نیمه صلب.

اختلاف (%)	عددی	آزمایشگاهی
۲,۳	۶۳۸,۳	۶۲۳,۵ (بیشینه‌ی بار (kN)
۴,۷	۶,۷	۷,۱ (بیشینه‌ی تغییر مکان (mm)
۸,۴	۴۸۹۷۳,۹	۴۴۸۵۹,۵ (جذب انرژی (kN.mm)
۵,۵	۹۵,۱	۸۹,۹ (سختی کل (kN.mm)



شکل ۱۲. منحنی نیرو - چرخه‌ی مدل نیمه صلب.



شکل ۱۳. منحنی انرژی جذب شده - چرخه‌ی مدل نیمه صلب.

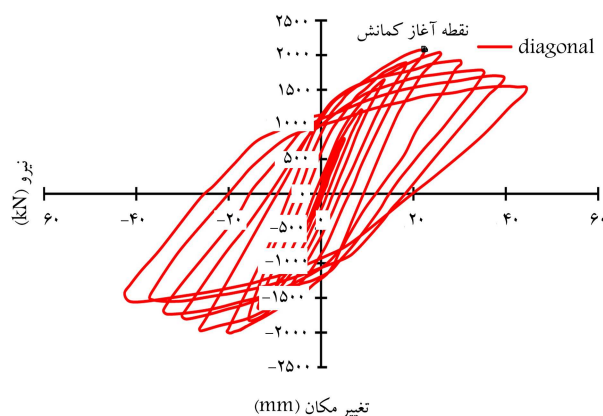
نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. در جدول ۴، مقایسه کمی نتایج ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج عددی و آزمایشگاهی تطابق مناسبی با یکدیگر دارند.

همچنین منحنی‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزاری: نیرو - چرخه و انرژی جذب شده - چرخه در مدل نیمه صلب، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده‌اند.

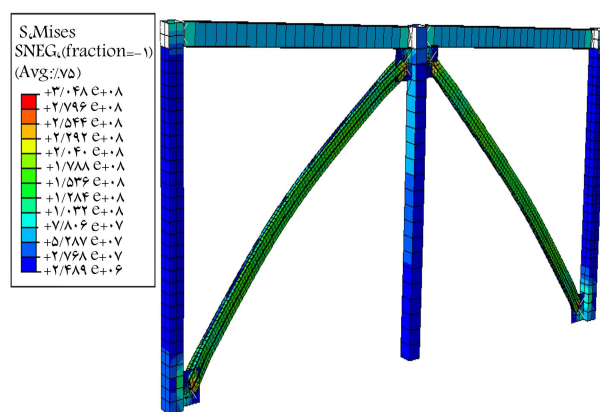
۴. توسعه‌ی سیستم نوین مهاربند لوزی شکل مجهز به

عضو تسلیم‌شونده‌ی حلقوی در قاب‌ها

به منظور توسعه‌ی سیستم پیشنهادی و بررسی عملکرد آن، باید مهاربند پیشنهادی به همراه قاب بررسی شود. بنابراین برای توسعه‌ی مهاربندها در قاب فولادی، سه نوع سیستم قاب با مهاربندی ارزیابی شده است. در هر سه سیستم اشاره شده، قاب موجود با دو دهانه و یک طبقه بوده است، تا بتواند عملکرد رفت و برگشتی



شکل ۱۷. منحنی هیستریزیس مدل مهاربند ساده.



شکل ۱۸. کانتور تنش فون مایسز مدل با مهاربند ساده.

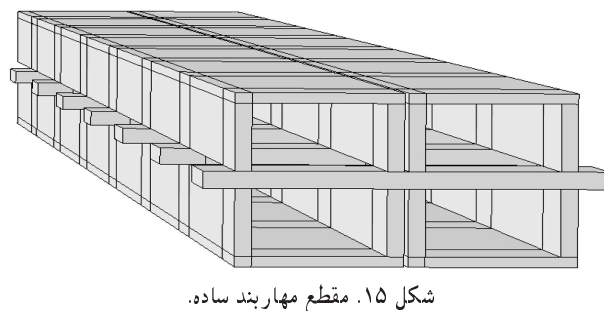
۱.۶. قاب با مهاربند ساده

منحنی نیرو - جابه‌جایی به دست آمده از نتایج آزمایش بر روی سیستم قاب با مهاربند ساده در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. در مدل قطری به منظور ایجاد نقص در پروفیل‌های فولادی از ایمپرفکشن ۱۲ (۱/۰٪ طول مهاربند به صورت خارج از صفحه) استفاده شده است. پس از دست‌یابی به مد شکل‌ها، تأثیر آنها در تحلیل هیستریزیس مدل قطری لحاظ شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ظرفیت باربری و سختی سیستم به ترتیب برابر ۷۰٪ و ۴۷ کیلونیوتن بر میلی‌متر بوده است. نحوه عملکرد قاب با مهاربند ساده بدین صورت است که پس از کماتش اولین مهاربند تحت تنش مورد نظر، به یک‌باره افت باری در ظرفیت مشاهده می‌شود و پس از هر رفت و برگشت، از مقدار آن کاسته شده و تا حدود ۲۵٪ افت مقاومت، بارگذاری ادامه یافته است. همچنین به دلیل این‌که هندسه و بارگذاری سیستم به صورت متقارن است، لذا منحنی هیستریزیس در ناحیه کشش و فشار تقریباً یکسان بوده است.

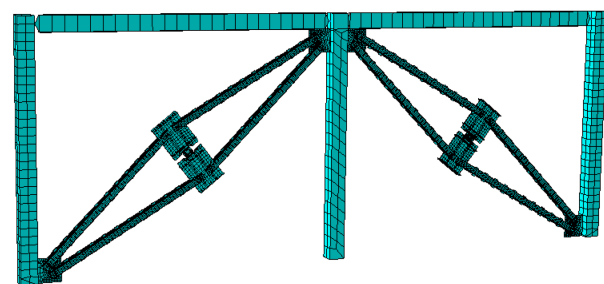
همچنین کانتورهای تنش فون مایسز و تسلیم المان به ترتیب در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ مشاهده می‌شود، که مطابق آن، اعضاء قاب به صورت کاملاً مفصلی عمل کرده و فقط مهاربند وارد ناحیه غیرخطی شده‌اند.

۲.۶. قاب با مهاربند لوزی نیمه‌صلب

با بررسی قاب با مهاربند ساده، به بررسی سیستم لوزی شکل با اتصال مفصلی



شکل ۱۵. مقطع مهاربند ساده.



شکل ۱۶. مش‌بندی صورت گرفته بر روی نمونه.

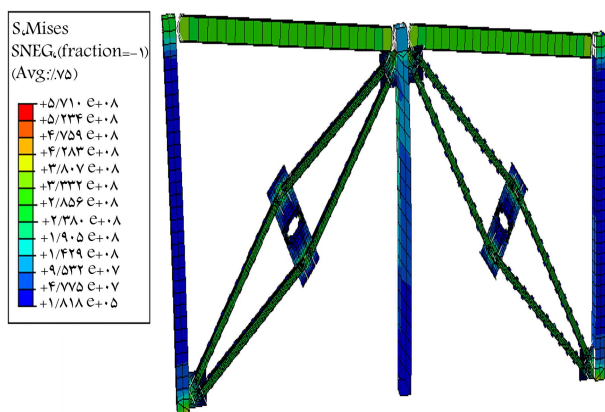
که در مدل نیمه‌صلب، اتصال‌ها همچنان مفصلی در نظر گرفته است، ولی به جای لوله‌ی شکل‌پذیر، ۲ ورق میانی با ۴ ورق ۳ میلی‌متری به یکدیگر متصل شده‌اند، که در مدل‌سازی بخش ذکر شده، ورق اتصال‌دهنده از نوع Shell با استفاده از قید Tie به ورق‌های میانی متصل شده است. در مدل قطری نیز از مقطع ۴UNP۸۰، که معادل مقطع استفاده شده در مهاربندهای مفصلی و نیمه‌صلب است، استفاده شده است. در مدل قطری، اتصال مهاربند با ورق اتصال (گاست‌ها) به صورت مفصلی تعیین شده است.

مطابق شکل ۱۶، کلیه‌ی اعضاء مهاربندی با استفاده از المان Solid مش‌بندی شده‌اند. المان در نظر گرفته شده به منظور مش‌بندی نمونه، المان C3D۸R بوده است، که المان مکعبی سه‌بعدی ۸ گره‌یی با سختی کاهش‌یافته است. برای مدل‌سازی تیر و ستون و گاست از المان Shell و در بخش کنونی از المان S4R استفاده شده است. ابعاد مش‌بندی برای اعضاء مختلف بین ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

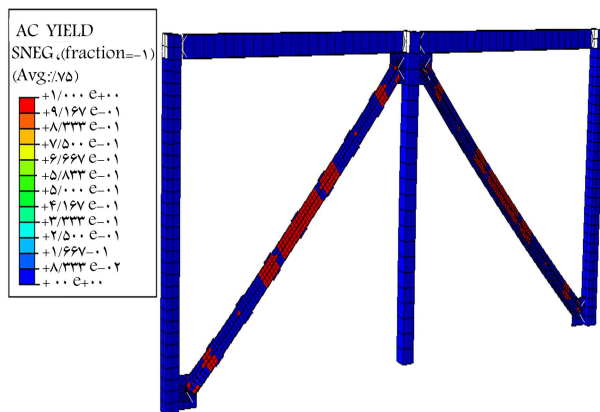
پدیده‌ی خستگی کم‌چرخه، که تحت اثر سیکل‌های با تعداد پایین و سطح تنش بالا تحت بار زلزله رخ می‌دهد، در سال‌های اخیر مورد بحث پژوهشگران بوده و جزء اهداف اصلی پژوهش حاضر نبوده است.

۶. بررسی و تفسیر نتایج

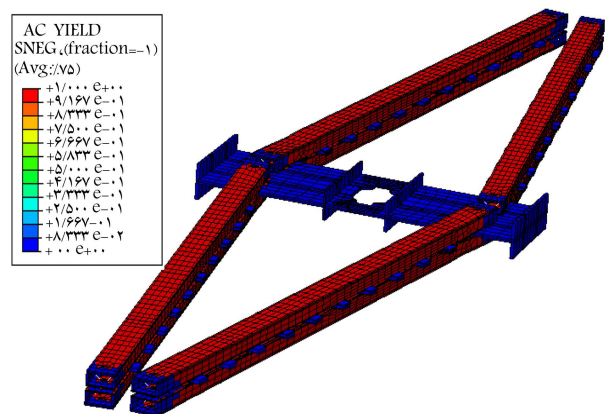
با انجام بارگذاری چرخه‌یی بر روی ۳ نمونه‌ی: نیمه‌صلب، مفصلی و ساده، نتایجی همچون منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی، بیشینه‌ی نیروی وارد شده، سختی، جابه‌جایی و مد خرابی حاصل شده است، که در ادامه به آنها پرداخته شده است. با توجه به این‌که مقاطع تیرها و ستون‌ها از مدل قاب با مهاربند ساده حاصل شده است، ابتدا به بررسی نتایج سیستم قاب با مهاربند ساده به عنوان سیستم پایه و در ادامه، به بررسی سیستم‌های مفصلی و نیمه‌صلب پرداخته شده است.



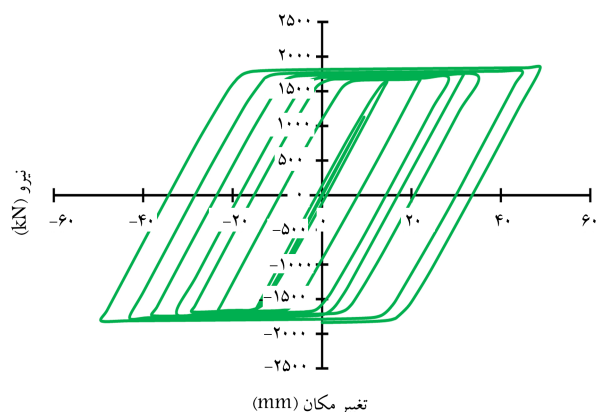
شکل ۲۱. کانتور تنش فون مایسز مدل نیمه صلب.



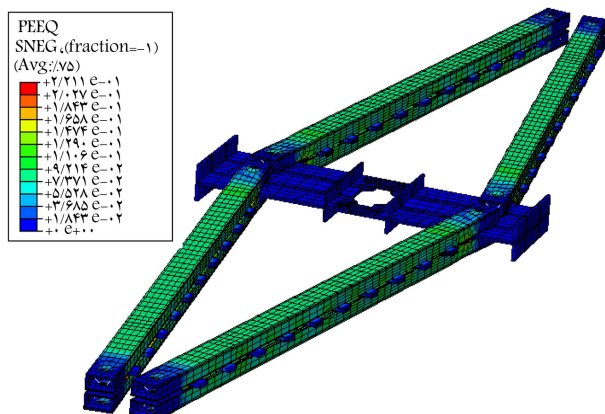
شکل ۱۹. کانتور تسلیم المان مدل با مهاربند ساده.



شکل ۲۲. کانتور کرنش خمیری معادل مدل نیمه صلب.



شکل ۴۰. نمودار هیستریزیس مدل با مهاربند نیمه صلب.



شکل ۲۳. کانتور تسلیم المان‌های مدل نیمه صلب.

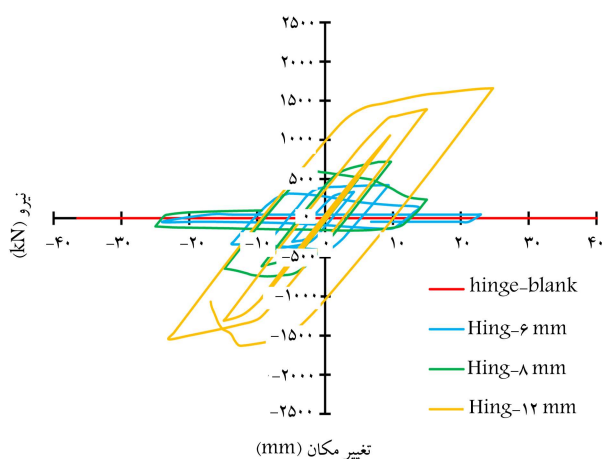
اما بدون حضور حلقه پرداخته شده است (مدل نیمه صلب). در این حالت فقط المان‌های مهاربندی با کماتش کلی و موضعی، باربری سیستم را انجام داده‌اند. در سیستم قاب با مهاربند لوزی نیمه صلب با توجه به این‌که از ورق‌های میانی به صورت جوش سراسری استفاده شده است، بنابراین انتظار می‌رود سیستم به صورت یک پارچه عمل کند و مقاومت آن تقریباً نزدیک به مدل با مهاربند ساده باشد. مطابق شکل ۲۰ مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری و سختی سیستم در حدود ۱۸۴۰ کیلونیوتن و ۳۷ کیلونیوتن بر میلی‌متر است، که در حدود ۱۰٪ کمتر از سیستم با مهاربند ساده بوده است. اما از مهم‌ترین مزایای سیستم ذکر شده می‌توان به خاصیت جذب انرژی بالای آن اشاره کرد، که در قسمت‌های آبی به آن پرداخته شده است. همچنین در سیستم اشاره شده هیچ‌گونه افت مقاومتی در ناحیه‌ی غیرخطی وجود نداشته و به صورت کاملاً پایدار رفتار کرده است. علی‌رغم اینکه اعضاء تیرها و ستون‌ها در ناحیه‌ی خطی رفتار کرده‌اند، اما اعضاء مهاربندی وارد ناحیه‌ی غیرخطی شده‌اند.

در شکل ۲۱ کانتور تنش فون مایسز به وجود آمده در مهاربند مشاهده می‌شود، که مطابق آن تمرکز تنش در مهاربند و کماتش موضعی در بخش انتهای مهاربند و نزدیک محل مفصل رخ داده است. همچنین سایر کانتورها نیز در شکل‌های ۲۲ الی ۲۴ ارائه شده‌اند، که گویای خمیری شدن مهاربند هستند.

۳.۶. قاب با مهاربند لوزی مفصلی

با توجه به نقاط ضعف قاب‌های با مهاربند ساده‌ی لوزی نیمه صلب، قاب با مهاربند

مفصلی مدل‌سازی و تحلیل شده و بدین منظور، دقیقاً از همان حلقه‌ی آزمایشگاهی استفاده شده است. بنابراین در قاب مذکور، همه‌ی اعضاء قاب و مهاربندی در ناحیه‌ی خطی رفتار کرده و فقط حلقه به عنوان المان تسلیم‌شونده وارد ناحیه‌ی خمیری شده و خراب شده است. در شکل ۲۵، نمودار هیستریزیس مدل قاب با مهاربندی لوزی مفصلی مشاهده می‌شود، که مطابق آن در سیستم مذکور نیز ناحیه‌ی کشش و فشار تقریباً به صورت متقارن با ظرفیت ۴۲ تن رفتار کرده و پس از وارد شدن حلقه به ناحیه‌ی غیرخطی، به تدریج از ظرفیت سیستم کاسته شده است. تنش‌های مایسز قسمتی از مهاربند نیز در شکل ۲۶ ارائه شده‌اند. همان‌طور



شکل ۲۷. جمع‌بندی نتایج هیستریزیس قاب با حلقه‌های مختلف.

که ملاحظه می‌شود، فقط حلقه‌ی تسلیم‌شونده دچار خرابی شده و وارد ناحیه‌ی غیرخطی شده است. همچنین حلقه در قاب تحلیل شده در نرم‌افزار نیز، عملکردی مشابه با نمونه‌ی آزمایشگاهی داشته است، که از دیگر دلایل عملکرد صحیح و مورد نظر مدل المان محدود در پژوهش حاضر است.

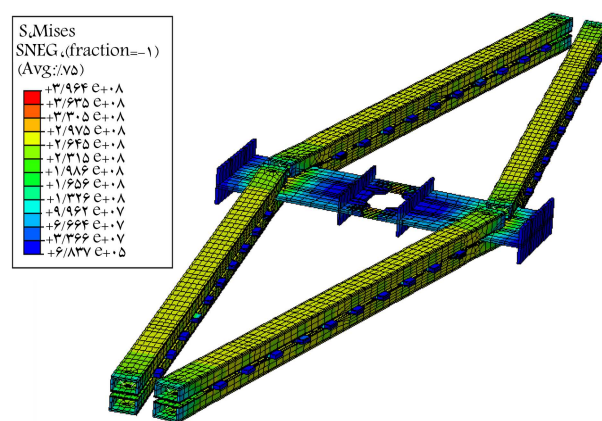
۷. مطالعه‌ی پارامتریک مدل مفصلی و بررسی میزان

تأثیر حلقه‌ی استفاده شده در عملکرد کلی قاب

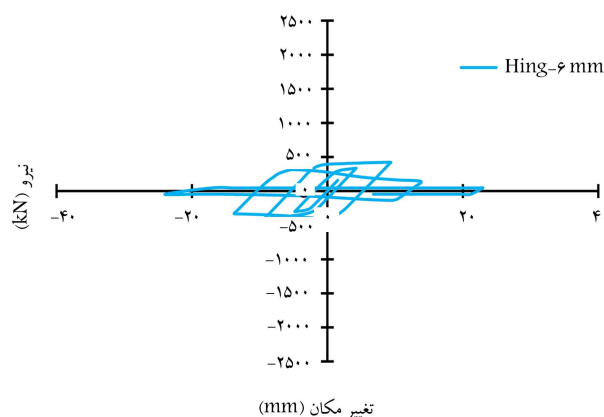
از جمله اهداف ارائه‌ی سیستم پیشنهادی ذکر شده و توسعه‌ی آن، ارائه‌ی یک سیستم مهاربندی با قابلیت هم‌زمان تعمیرپذیری، شکل‌پذیری و جذب انرژی مناسب بوده است. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته، امکان برقراری قابلیت‌های اشاره شده، به ویژه تعمیرپذیری، فقط در نمونه‌ی مفصلی امکان‌پذیر است. از طرفی، سیستم مفصلی با حلقه با ضخامت ۶ میلی‌متر، ظرفیت کمتری نسبت به سیستم با مهاربند ساده و نیمه‌صلب از خود ارائه کرده است. بنابراین، در راستای برطرف کردن ایراد آن و همچنین بررسی میزان تأثیر حلقه‌ی استفاده شده در عملکرد کلی قاب و درک بهتر مزایای سیستم مهاربند مفصلی با حلقه، مدل‌های با ضخامت‌های مختلف حلقه نیز بررسی شده‌اند. بدین منظور از حلقه‌های با ضخامت‌های صفر (بدون حلقه)، ۸ و ۱۲ میلی‌متر نیز استفاده شده است.

به عنوان جمع‌بندی، نتایج حاصل از تحلیل قاب با مهاربند مفصلی با حلقه‌های صفر، ۶، ۸ و ۱۲ میلی‌متر در شکل ۲۷ ارائه شده است.

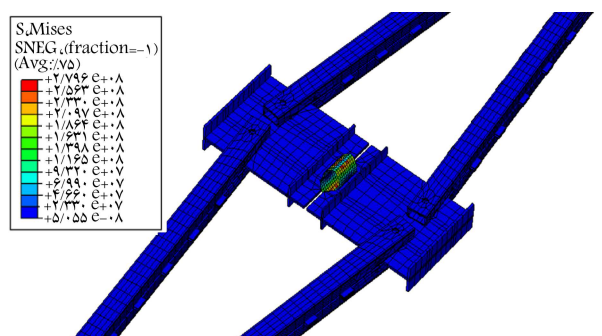
مطابق شکل ۲۷، با توجه به این‌که کلیه‌ی اتصال‌ها به صورت مفصلی بوده‌اند، بنابراین در مدل با حلقه به قطر صفر (بدون حلقه)، عملاً سیستم به صورت مکانیزم عمل کرده و هیچ‌یک از اعضا، تنش را متحمل نشده‌اند. با افزایش قطر حلقه، ظرفیت سیستم به طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. به نحوی که با استفاده از حلقه با ضخامت ۱۲ میلی‌متر و مطابق با همان شرایط سایر مدل‌ها، ظرفیتی در حدود ۱۷۰ تن داشته است، که نزدیک به ظرفیت سیستم قاب با مهاربند نیمه‌صلب است. بنابراین، استفاده از حلقه با ضخامت‌های مختلف می‌تواند ظرفیت‌های موردنیاز در بارگذاری‌های گوناگون را برطرف کند و محدودیتی در این زمینه ایجاد نکند و در نهایت به عنوان سیستمی ایده‌آل در راستای اهداف مورد نظر پژوهش، معرفی و پیشنهاد شده است.



شکل ۲۴. کانتور تنش فون مایسز مدل نیمه‌صلب.



شکل ۲۵. منحنی هیستریزیس مدل مفصلی - حلقه با ضخامت ۶ میلی‌متر.



شکل ۲۶. کانتور تنش فون مایسز مدل مفصلی - حلقه با ضخامت ۶ میلی‌متر.

جدول ۵. خلاصه‌ی نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها.

مفصلی بدون حلقه	مفصلی ۶ میلی متر	مفصلی ۸ میلی متر	مفصلی ۱۲ میلی متر	نیمه صلب	قطری
-	۴۲۱/۳	۷۴۳/۴	۱۶۵۹/۶	۱۸۴۰/۱	۲۰۷۰/۸
-	۲۴	۲۴/۹	۲۴/۸	۴۹/۴	۴۴/۳
-	۲۴/۲	۳۰/۱	۸۸	۸۶۹/۹	۵۹۹
-	۱۷/۶	۳۶/۶	۶۸/۹	۳۷/۵	۴۶/۹
-	۳۰۱/۶	۴۳۷/۹	۱۰۵۶	۱۱۲۶/۶	۱۰۲۶/۳
-	۴۲۱/۲	۷۱۹/۷	۱۶۵۹/۶	۱۷۹۸/۱	۱۹۶۴/۶
بیشینه‌ی بار (kN)					
بیشینه‌ی تغییر مکان (mm)					
انرژی تلف شده (kJ)					
سختی اولیه (kN/mm)					
تنش تسلیم (kN)					
تنش نهایی (kN)					

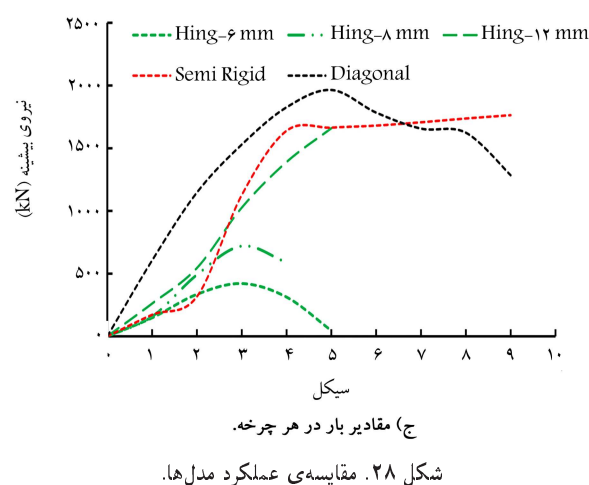
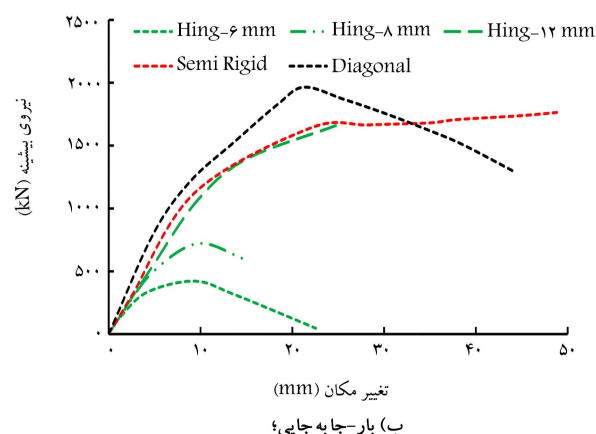
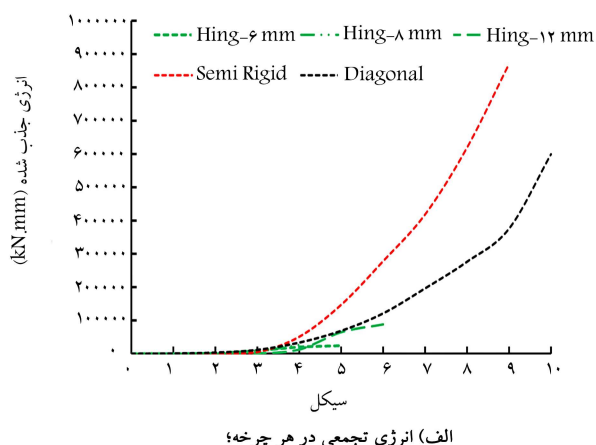
۸. مقایسه‌ی مدل‌ها با یکدیگر

پس از انجام تحلیل‌های چرخشی، نمودارهای هیستریزیس هر سه نمونه با مهاربندهای ساده، نیمه صلب و مفصلی به دست آمده‌اند، که نتایج آنها در جدول ۵ به صورت کمی و شکل ۲۸ به صورت کلی ارائه شده‌اند. همان طور که از جدول ۵ ملاحظه می‌شود، استفاده از سیستم لوزی با اتصال‌های مفصلی و حلقه‌یی با ضخامت ۱۲ میلی‌متر، علی‌رغم این‌که نسبت به سیستم‌های نیمه صلب و ساده ظرفیت کمتری داشته است (۱۰ و ۲۰ درصد) اما به دلیل رفتار سیستم مهاربندی و قاب در ناحیه‌ی خطی، قابلیت تعمیرپذیری و همچنین قابلیت افزایش ظرفیت فعلی سیستم با جایگزینی حلقه‌هایی با ضخامت بیشتر، مناسب و منطقی بوده است. همچنین می‌توان به این‌که نکته‌ی پی برد که سیستم دارای حلقه، با تغییر مکان کمتری (حدود ۴۵٪) نسبت به سایر سیستم‌ها (ساده و نیمه صلب)، به ظرفیت باربری مورد نظر می‌رسد. با مقایسه‌ی بین ظرفیت جذب انرژی مدل‌ها می‌توان گفت که در سیستم با حلقه‌یی به ضخامت ۱۲ میلی‌متر، ظرفیت آن تا حدود ۱/۴۵ برابر نسبت به مهاربند ساده بیشتر بوده است. بنابراین به دلیل خاصیت استهلاک انرژی مناسب آن نسبت به مهاربندهای ساده، عملکرد بهتری در برابر زلزله از خود نشان داده است. بنابراین با نگاهی کلی به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که سیستم مهاربندی مفصلی به عنوان پیشنهاد نهایی پژوهش حاضر هم به لحاظ عملکرد و هم به لحاظ ظرفیت و ... تا حد قابل قبولی نسبت به سایر سیستم‌های رایج ارجحیت داشته است و می‌توان با انتخاب حلقه‌هایی مناسب، نیازهای سازه‌یی را مرتفع کرد.

۹. مقایسه‌ی نتایج با سایر سیستم‌های لرزه‌یی نوین ارائه شده

بررسی مطالعات سیستم‌های نوین پیشنهادی در مطالعات پیشین، علاوه بر داشتن ویژگی‌ها و محاسن خاص خود، ضعف‌های مشترکی دارند، که نیاز به ارائه‌ی سیستمی جدید در راستای پوشش آنها و نیز محدودیت‌ها، اهمیت بسیاری دارد. از جمله محدودیت‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد:

- پس از گسیختگی المان شکل‌پذیر، سیستم کاملاً گسیخته می‌شود و در عمل، سیستم قابلیت ادامه‌ی کار و گرفتن ظرفیت بیشتر نیرو را نخواهد داشت.
- عملکرد المان شکل‌پذیر با اعضاء مهاربندی به صورت سری بوده و در برخی مواقع نیز منجر به غیرخطی شدن اعضاء مهاربندی شده است.
- استفاده از حلقه‌هایی با قطر و ضخامت زیاد در راستای افزایش ظرفیت اعمال نیرو و اقتصادی نبودن آنها.



جدول ۶. نتایج مقایسه‌ی مطالعه‌ی نقوی و همکاران.^[۳۰]

ظرفیت (Ton)	جذب انرژی (kN.m)	تغییر مکان جانبی قاب (mm)	سختی (kN/mm)
XCBF	۱۶۵	۳۵	۰/۹
	۱۳۰	۳۵	۱/۲۹
	۱۴۰	۳۵	۱/۲۹
	۲۰۵	۳۵	۲/۸۶
VCBF	۱۳۰	۳۵	۱/۲۹
	۱۴۰	۳۵	۱/۲۹
	۲۰۵	۳۵	۲/۸۶
	۱۶۵	۳۵	۰/۹
IVCBF	۱۳۰	۳۵	۱/۲۹
	۱۴۰	۳۵	۱/۲۹
	۲۰۵	۳۵	۲/۸۶
	۱۶۵	۳۵	۰/۹
X ^۲ CBF	۱۶۵	۳۵	۰/۹
	۱۳۰	۳۵	۱/۲۹
	۱۴۰	۳۵	۱/۲۹
	۲۰۵	۳۵	۲/۸۶
SBRF	۱۰۵	۳۵	۱/۶
	۱۳۵	۳۵	۴/۱۴
	۱۳۵	۳۵	۴/۱۴
	۱۵۰	۳۵	۴/۱۴
VBRB	۱۳۵	۳۵	۴/۱۴
	۱۳۵	۳۵	۴/۱۴
	۱۳۵	۳۵	۴/۱۴
	۱۵۰	۳۵	۴/۱۴
IVBRB	۱۳۵	۳۵	۴/۱۴
	۱۳۵	۳۵	۴/۱۴
	۱۳۵	۳۵	۴/۱۴
	۱۵۰	۳۵	۴/۱۴
X ^۲ BRB	۱۵۰	۳۵	۴/۱۴
	۱۳۵	۳۵	۴/۱۴
	۱۳۵	۳۵	۴/۱۴
	۱۵۰	۳۵	۴/۱۴

- محدودیت‌های اتصال عضو شکل‌پذیر به المان‌های مهاربندی.

- محدودیت‌های اجرایی.

با جمع‌بندی نتایج جدول ۶، که در دو حالت کاملاً معادل‌سازی شده‌ی سیستم مهاربندی نوین لوزی‌شکل و سیستم BRB با سیستم CBF بررسی شده است، می‌توان به این نکته دست یافت که علی‌رغم این‌که تغییر مکان کلی قاب با مهاربند نوین لوزی‌شکل کمتر از قاب با مهاربند CBF است، اما به لحاظ ظرفیت، شکل‌پذیری و سختی کل سیستم، دست کمی از سیستم BRB ندارد و عملکرد قابل قبولی ارائه می‌دهد. همچنین سهولت در تهیه، ساخت و اجرای مهاربند لوزی‌شکل پیشنهادی نیز حائز توجه بوده است، که چه بسا نسبت به مهاربند BRB ارجحیت نیز دارد.

همچنین با توجه به محدودیت‌های اشاره شده در مطالعات پیشین و با بررسی جزئیات هندسی سیستم پیشنهادی در پژوهش حاضر و همچنین نتایج به دست آمده از آن مشاهده می‌شود که با قطر و ضخامت کمتر حلقه‌ی فولادی، ظرفیت بار بیشتری حاصل شده است، که ضمن قابلیت تعمیرپذیری حلقه‌ی فولادی، قابلیت ادامه‌ی کار سیستم و عدم فروریزش آن پس از گسیختگی حلقه‌ی فولادی نیز وجود دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سیستم پیشنهادی به لحاظ کارایی و اقتصادی، قابلیت مناسب‌تری نسبت به سایر سیستم‌های اشاره شده دارد و شایسته‌ی بررسی‌های بیشتر در راستای به کارگیری آن در صنعت ساخت و ساز و اجرایی شدن آن است. طبیعتاً با توجه به نو بودن سیستم پیشنهادی، می‌توان ضعف‌های آن، از قبیل تغییر مکان کم (در حالت بدون قاب) را در مطالعات آتی بررسی بیشتر و رفع کرد.

با توجه به محدودیت‌های اشاره شده در مطالعات پیشین و با بررسی جزئیات هندسی سیستم پیشنهادی در پژوهش حاضر و همچنین نتایج به دست آمده از آن مشاهده می‌شود که با قطر و ضخامت کمتر حلقه‌ی فولادی ظرفیت بار بیشتری حاصل شده است، که ضمن قابلیت تعمیرپذیری حلقه‌ی فولادی، قابلیت ادامه‌ی کار سیستم و عدم فروریزش آن پس از گسیختگی حلقه‌ی فولادی نیز وجود دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سیستم پیشنهادی به لحاظ کارایی و اقتصادی، قابلیت مناسب‌تری نسبت به سایر سیستم‌های اشاره شده دارد و شایسته‌ی بررسی‌های بیشتر در راستای به کارگیری آن در صنعت ساخت و ساز و اجرایی شدن آن است.

۱۰. مقایسه‌ی اقتصادی

پس از بررسی و مقایسه‌ی عملکرد و ابعاد فنی سیستم مهاربند نوین پیشنهادی با سایر مطالعات پیشین، حال به بررسی و مقایسه‌ی اقتصادی سیستم پیشنهادی با

پس از بررسی و جمع‌بندی محاسن و معایب سیستم نوین پیشنهادی در مقایسه با سایر سیستم‌هایی که از المان شکل‌پذیر استفاده کرده‌اند، مشخص شد که مهاربند لوزی‌شکل با حلقه‌ی فولادی عملکرد مطلوبی دارد و در کارهای اجرایی بسیار توجیه‌پذیر است. اما به منظور مقایسه‌ی عملکرد آن با سیستم‌های مهاربندی که به خودی خود، خصوصیات شکل‌پذیری و جذب انرژی مناسبی دارند، بدون آن‌که از المان شکل‌پذیر مجازی استفاده شود، عملکرد سیستم مهاربندی نوین لوزی‌شکل، با عملکرد مهاربندهای BRB به عنوان نمونه ارزیابی شده است. بدین منظور، در مطالعات نقوی و همکاران (۲۰۱۸)^[۳۰] به مطالعه‌ی عددی عملکرد هیستریزیس قاب‌های دارای مهاربند CBF و BRBF پرداخته شده و هدف این بوده است که رفتار مهاربندها را در ۴ قاب یک‌دهانه و ۲ طبقه بررسی کنند. عرض هر دهانه، ۴ متر و ارتفاع هر طبقه‌ی آن ۳ متر بوده است. مقاطع ستون‌ها و تیرها به ترتیب برابر $2IPE220$ و $IPE220$ بوده است. مهاربند CBF و هسته‌ی مهاربند BRB به ترتیب برابر $2UNP100$ و $27/5 \times PL130$ بوده است، که اساس هندسه‌ی مدل‌های طراحی شده بر اساس مقررات لرزه‌ی AISC است.^[۳۱] مدل‌های ساخته شده در آباکوس، به کمک مطالعات آزمایشگاهی برخی مراجع،^[۳۲-۳۴] صحت‌سنجی شدند. برای مهاربند CBF، حالت‌های V، V، X و V، و وارون و X دو طبقه و برای مهاربند BRB حالت‌های قطری، V، V و وارون و X دو طبقه در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده‌اند. همچنین خصوصیات هندسی و ابعادی هر دو نوع سیستم با یکدیگر معادل بودند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که مقاومت در برابر کمانش المان‌های مهاربند BRB اجازه می‌دهد که بدون تشکیل مفصل خمیری، خاصیت شکل‌پذیری و جذب انرژی بالایی ارائه دهند. نتایج مقایسه‌ی قاب‌ها در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، علی‌رغم این‌که هر دو سیستم، تغییر مکان جانبی یکسان داشته‌اند، اما ظرفیت سیستم با مهاربند BRB در حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد سیستم CBF بوده است، اما ظرفیت جذب انرژی آن تا حدود ۲ برابر سیستم CBF است. همچنین سختی کل (نه سختی اولیه) سیستم در حالت با مهاربند BRB تا حدود ۳/۲ برابر مهاربند CBF بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با وجود این‌که ظرفیت نهایی سیستم با مهاربند BRB کمتر از CBF بوده است، اما به علت وجود هسته‌ی بتنی و مقاومت در برابر کمانش‌های زود هنگام، ظرفیت جذب انرژی قابل قبولی دارد.

جدول ۷. مقایسه‌ی اقتصادی مهاربند نوین لوزی شکل با مهاربند قطری.

مدل	قطعات	تعداد	وزن (کیلوگرم)	قیمت (تومان)	مجموع هزینه‌ها (تومان)
لوزی	ناودانی	۱۶	۳۶۰	۳۶۰۰۰۰۰	۸۳۱۶۰۰۰
	حلقه‌ی فولادی	۲	۳/۴	۷۰۰۰۰	
	پیچ و مهره	۱۶	-	۳۲۰۰۰۰۰	
	برش گیر	۸۰	۳۷/۷	۲۶۴۰۰۰	
	سخت کننده	۸	۳۱/۴	۲۲۰۰۰۰	
	ورق‌های اتصال حلقه به مهاربند	۴	۶۶	۴۶۲۰۰۰	
	جوشکاری	-	-	۳۰۰۰۰۰۰	
	برش کاری و سوراخ کاری	-	-	۲۰۰۰۰۰۰	
قطری	ناودانی	۱۶	۳۶۰	۳۶۰۰۰۰۰	۴۷۵۴۰۰۰
	پیچ و مهره	۴	-	۸۰۰۰۰۰۰	
	برش گیر	۳۲	۱۴/۸	۱۰۴۰۰۰	
	جوش کاری	-	-	۱۰۰۰۰۰۰	
	برش کاری و سوراخ کاری	-	-	۱۵۰۰۰۰۰	

با توجه به مکانیزم سیستم مذکور، تعویض حلقه امری است که به سهولت انجام می‌پذیرد. بنابراین هزینه‌ی پس از زلزله در مهاربند لوزی شکل فقط ۷۰۰۰۰ تومان است.

با جمع‌بندی مطالب عنوان شده، می‌توان دریافت که هزینه‌ی تولید، اجرا و تعویض مهاربند قطری برابر ۹۵۰۸۰۰۰ تومان و هزینه‌ی مهاربند لوزی شکل برابر ۸۳۸۶۰۰۰ تومان است، که تقریباً ۱۴٪ کمتر است. بنابراین استفاده از مهاربند لوزی شکل به لحاظ فنی و اقتصادی توجیه‌پذیر است. البته می‌توان با انجام مطالعات بیشتر در خصوص مهاربند پیشنهادی، مدل اقتصادی‌تری نیز ارائه کرد.

۱۱. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، به بررسی عددی و توسعه‌ی عملکرد چرخشی سیستم نوین مهاربندی لوزی شکل درون یک قاب با ۲ دهانه و یک طبقه پرداخته شده است، که در آن ۲ نوع اتصال‌های نیمه‌صلب و اتصال‌های مفصلی به همراه حلقه‌ی فولادی معرفی شده است، که هر دو نوع ابتدا در نرم افزار آباکوس صحت‌سنجی شده‌اند.

در ادامه، مهاربند‌های لوزی شکل با اتصال‌های نیمه‌صلب و همچنین اتصال‌های مفصلی با حلقه‌هایی با ضخامت‌های ۸، ۶ و ۱۲ میلی‌متر و عدم وجود حلقه بررسی و با رفتار مهاربند ساده (هم‌محور) مقایسه شده‌اند، که این نتایج به دست آمده است:

- استفاده از حلقه‌ی فولادی در سیستم نوین پیشنهادی، به عنوان عضو تسلیم‌شونده و تمامی اعضاء مهاربند و قاب در حالت کشسان رفتار می‌کنند.
- با توجه به این‌که رابطه‌ی غیرمستقیم بین ظرفیت حلقه و سیستم لوزی برقرار

سایر سیستم‌ها پرداخته شده است. یکی از مهم‌ترین موضوعات در بحث پروژه‌های عمرانی، مسئله‌ی توجیه اقتصادی است. با توجه به این‌که مدل مفصلی با حلقه، به عنوان مدل نهایی و هدف انتخاب شده است، مسئله‌ی اقتصادی مدل مذکور با مدل قطری، که تقریباً یکی از مرسوم‌ترین نوع مهاربند‌ها در پروژه‌های عمرانی است، مقایسه شده است.

با توجه به این‌که مهاربند مفصلی و قطری از قبل با یکدیگر معادل‌سازی شده‌اند، بنابراین به لحاظ عملکردی در شرایط یکسان مقایسه شده‌اند. بدین منظور یک قاب با ۲ دهانه و یک طبقه به همراه مهاربند مورد نظر در نظر گرفته شده است. بنابراین اعضاء تیر و ستون و اتصال‌های قاب‌ها با هم برابر هستند. پس تفاوت آنها، فقط در هزینه‌های خود مهاربند است.

بنابراین با توجه به هندسه‌ی قاب و جانمایی مهاربند‌ها، از هر مهاربند دو عدد در قاب موجود است. در جدول ۷، به تفکیک، وزن و قیمت هر مهاربند ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مجموع هزینه‌های ساخت مهاربند نوین لوزی شکل برابر ۸۳۱۶۰۰۰ تومان و مهاربند قطری برابر ۴۷۵۴۰۰۰ تومان است. این بدین معنی است که هزینه‌ی ساخت مهاربند لوزی شکل تقریباً ۷۵٪ بیشتر از مهاربند قطری است، اما نکته‌ی قابل توجه این است که مسائل اقتصادی فقط به هزینه‌ی ساخت و اجرا محدود نمی‌شود، بلکه یک مهندس طراح و یا مجری ساختمان باید به هزینه‌های پس از زلزله در ساختمان نیز توجه کند. با توجه به این‌که پس از زلزله، مدل قطری دچار کم‌انرژی شده و عملاً قابلیت استفاده‌ی مجدد نداشته است، پس باید در صورت عدم وجود محدودیت‌های اجرایی و ...، کل مهاربند به همراه اتصال‌های آن تعویض شوند. بنابراین هزینه‌ی مجددی معادل با ۴۷۵۴۰۰۰ تومان باید در نظر گرفته شود. اما در مهاربند نوین لوزی شکل پیشنهادی، پس از زلزله فقط حلقه‌ی فولادی دچار خرابی شده و مابقی اعضاء و اتصال‌ها سالم باقی مانده‌اند، پس فقط باید حلقه‌ی فولادی را تعویض کرد، که

کشسان کار کنند)، ظرفیت جذب انرژی را نسبت به سیستم قاب با مهاربند هم‌محور تا حدود ۴۵٪ افزایش داد.

- قاب با سیستم مهاربندی لوزی شکل در حالت بدون حضور حلقه (وجود المان لینک)، رفتاری شبیه به مهاربند هم‌محور دارد، اما از آنجایی که اعضاء مهاربندی دچار کماتش خواهند شد، بنابراین نسبت به سیستم با حضور حلقه ارجحیت ندارد.

است، لذا می‌توان به کمک حلقه‌یی با ظرفیت مشخص، به سیستم مهاربندی با ظرفیت حدود ۹ برابر آن دست یافت.

- استفاده از حلقه‌ی فولادی در قاب با مهاربند لوزی شکل، نه فقط قابلیت ارائه‌ی رفتار شکل پذیرتری را در سیستم می‌تواند به وجود آورد، بلکه می‌تواند ظرفیتی تا حدود ۷۵٪ سیستم قاب با مهاربند هم‌محور به وجود آورد.

- می‌توان به کمک حلقه‌های با ضخامت بیشتر (به طوری که سیستم کلی به صورت

پانویس‌ها

1. Kelly
2. Chen & Albermani
3. Kafi
4. Rakicevic & Jurukovski
5. Roufegarinejad & Sabouri
6. Peng
7. Bazzaz
8. Andalib
9. Gao
10. Kheyroddin
11. ABAQUS
12. Imperfection

منابع (References)

1. Lotfollahi, M. and Mofid, M. "Innovative method in seismic design of slab-on-girder steel bridges", *Constructional Steel Research*, **64**(12), pp. 1420-1435 (2008).
2. Hsu, H.L., Juang, J.L. and Chou, C.H. "Experimental evaluation on the seismic performance of steel knee braced frame structures with energy dissipation mechanism", *Steel and Composite Structures*, **11**(1), pp. 77-91 (1979).
3. Murthy, A.N.C.K. "Application of visco-hyperelastic devices in structural response control", *The degree of Master of Science, Civil Engineering Department, Blacksburg Polytechnic Institute, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA* (2005).
4. Marshall, J.D. and Charney, F.A. "A hybrid passive control device for steel structures, I: Development and analysis", *Constructional Steel Research*, **66**(10), pp. 1278-1286 (2010a).
5. Marshall, J.D. and Charney, F.A. "A hybrid passive control device for steel structures, II: Physical testing", *Constructional Steel Research*, **66**(10), pp. 1287-1294 (2010b).
6. Moghaddam, H. and Estekanchi, H. "On the characteristics of off-centre bracing system", *Constructional Steel Research*, **35**(3), pp. 361-376 (1995).
7. Amadio, C., Clemente, I., Macorini, L. and et al. "Seismic behaviour of hybrid systems made of PR composite frames coupled with dissipative bracings", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **37**(6), pp. 861-879 (2008).
8. Annan, C.D., Youssef, M.A. and El Naggar, M.H. "Experimental evaluation of the seismic performance of modular steel-braced frames", *Engineering Structures*, **31**(7), pp. 1435-1446 (2009).
9. Afsar Dizaj, E., Fanaie, N. and Zarifpour, A. "Probabilistic seismic demand assessment of steel frames braced with reduced yielding segment buckling restrained braces", *Advances in Structural Engineering*, **21**(7), pp. 1002-1020 (2018).
10. Fanaei, N. and Dizaj, E. "Response modification factor of the frames braced with reduced yielding segment BRB", *Structural Engineering and Mechanics*, **50**(1), pp. 001-017 (2014).
11. Kelly, J.M., Slinger, R.I. and Heine, A.J. "Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures", *Bulletin of New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, **5**(3), pp. 63-88 (1972).
12. Slinger, R.I., Kelly, J.M. and Heine, A.J. "Hysteresis dampers for earthquake resistant structures", *Earthquake Engineering and Structure Dynamic*, **3**(3), pp. 287-296 (1974).
13. Chan, W.K. and Albermani, F. "Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation", *Engineering Structures*, **30**(4), pp. 1058-1066 (2008).
14. Kafi, M.A. "Analytical and experimental study of effect of steel ring on ductility of concentric braces", *The degree of Doctorate of Philosophy, Civil Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran* (2008).
15. Rakicevic, Z. and Jurukovski, D. "Behavior factor (q-factor) for non-standard dual steel frame structures", *11th European Conference on Earthquake Engineering* (1998).
16. Roufegarinejad, A. and Sabouri, S. "Nonlinear behavior of yielding damped bracing frames", *15th ASCE Engineering Mechanics Conference*, Columbia University, New York (2002).
17. Motamedi, M., Hafezi, M. and Yekrangnia, M. "Analytical study of steel ring connections as hysteretic metallic damper", *15 WCEE* (2012).

18. Peng, X.T., Lin, C., Cao, Y.M. and et al. "Seismic behaviors of the composite central brace with steel ring damper", *7th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2018)*, pp. 1089-1092 (2018).
19. Bazzaz, M., Kheyroddin, A., Kafi, M.A. and et al. "Evaluation of the seismic performance of off-centre bracing system with ductile element in steel frames", *Steel and Composite Structures*, **12**(5), pp. 1-20 (2012).
20. Andalib, Z., Kafi, M.A., Kheyroddin, A. and et al. "Experimental investigation of the ductility and performance of steel rings constructed from plates", *Journal of Constructional Steel Research*, **103**, pp. 77-88 (2014).
21. Bazzaz, M., Kheyroddin, A., Kafi, M.A. and et al. "Evaluating the seismic performance of off-centre bracing system with circular element in optimum place", *International Journal of Steel Structures*, **14**(2), pp.1-12 (2014).
22. Bazzaz, M., Andalib, Z., Kafi, M.A. and et al. "Evaluating the performance of OBS-C-O in steel frames under monotonic load", *Earthquakes and Structures*, **8**(3), pp. 697-710 (2015).
23. Bazzaz, M., Andalib, Z., Kheyroddin, A. and et al. "Numerical comparison of the seismic performance of steel rings in off-centre bracing system and diagonal bracing system", *Steel and Composite Structures*, **19**(4), pp. 917-937 (2015).
24. Gao, N., Jeon, J.S., Hodgson, D.E. and et al. "An innovative seismic bracing system based on a superelastic shape memory alloy ring", *Smart Materials and Structures*, **25**(5), pp. 1-16 (2016).
25. Andalib, Z., Kafi, M.A., Bazzaz, M. and et al. "Numerical evaluation of ductility and energy absorption of steel rings constructed from plates", *Engineering Structures*, **169**, pp. 94-106 (2018).
26. Peng, X., Lin, C., Cao, Y. and et al. "Nonlinear finite element simulation on seismic behaviour of steel frame-central brace with ring damper", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **472**(1), 012031, pp.1-10 (2019).
27. Kheyroddin, A., Sepahrad, R., Saljoughian, M. and et al. "Experimental evaluation of RC frames retrofitted by steel jacket, X-brace and X-brace having ductile ring as a structural fuse", *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, **4**(11) (2019).
28. AISC, "Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic application", Chicago, USA (2016).
29. Applied Technology Council, "Guidelines for seismic testing of components of steel structures", *Report of ATC-24*, Redwood City, CA, USA (1992).
30. Naghavi, M., Rahnavard, R., Thomas, R.J. and et al. "Numerical evaluation of the hysteretic behavior of concentrically braced frames and buckling restrained brace frame systems", *Journal of Building Engineering*, **22**, pp. 415-428 (2019).
31. AISC, "Seismic provisions for structural steel buildings", Chicago, USA (2005).
32. Mirtaheri, M., Gheidi, A., Zandi, A.P. and et al. "Experimental optimization studies on steel core lengths in buckling restrained braces", *Journal of Constructional Steel Research*, **67**(8), pp. 1244-1253 (2011).
33. ΔJia, M., Lu, D., Guo, L. and et al. "Experimental research and cyclic behavior of buckling-restrained braced composite frame", *Journal of Constructional Steel Research*, **95**, pp. 90-105 (2014).
34. Berman, Je.W. and Bruneau, M. "Experimental and analytical investigation of tubular links for eccentrically braced frames", *Engineering Structures*, **29**(8), pp. 1929-1938 (2007).