

ارزیابی آزمایشگاهی و عددی سیستم نوین مهاربندی با عضو لوزی شکل مجهز به میراگر

تسلیم شونده

قاسم پاچیده^۱، محمدعلی کافی^{۲*}، مجید قلهکی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ghpachideh@semnan.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، mkafi@semnan.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، mgholhaki@semnan.ac.ir

چکیده

با توجه به تلاش های محققان در راستای افزایش شکل پذیری سیستم های مهاربندی، استفاده از حلقه فولادی بعنوان فیوز کنترلی در سال های اخیر مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است که دارای محاسن و معایب مختلفی می باشد. بنابراین در راستای پوشش معایب موجود در این سیستم، در این مقاله به معرفی و بررسی عملکرد آزمایشگاهی سیستم نوین مهاربندی و ترکیب آن با میراگر تسلیم شونده پرداخته می شود. این سیستم که در راستای افزایش شکل پذیری، جذب انرژی بالاتر و پوشش ضعف های سیستم های موجود مورد پیشنهاد و بررسی قرار گرفته است، از یک عضو مهاربند لوزی شکل به همراه میراگر تسلیم شونده حلقوی در وسط آن تشکیل شده است. در ساخت نمونه ها ۳ مدل مختلف با اتصالات سخت، نیمه سخت و ساده مدنظر قرار گرفته است که پس از ساخت، تحت بار چرخه ای قرار گرفته و نتایج آنها با یکدیگر مورد مقایسه شدند. نتایج این تحقیق در وهله اول بیانگر قابلیت اجرایی شدن سیستم و در ادامه نشان از قابلیت بالای هر سه سیستم در جذب انرژی و شکل پذیری را می دهد. همچنین با توجه به هندسه اعضای مهاربندی و میراگر، با ابعاد و ضخامت کوچکتر حلقه فولادی می توان به جذب انرژی بالاتر و نیروی وارد شده بیشتری برای تسلیم میراگرها نسبت به سایر سیستم های موجود دست یافت. در نهایت نیز در راستای امکان سنجی مدلسازی سیستم پیشنهادی در نرم افزارهای المان محدودی، مدل المان محدودی سیستم پیشنهادی در نرم افزار آباکوس^۱ مورد مدلسازی و صحت سنجی قرار گرفت که نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی دارای هماهنگی مناسبی می باشد. همچنین ضریب شکل پذیری مدل ساده نسبت به مدل سخت و نیمه سخت به ترتیب ۱/۱۲ و ۱/۱۷ برابر می باشد. ظرفیت جذب انرژی مدل ساده نیز تا حدود ۴/۵ و ۲/۱۵ برابر مدل سخت و نیمه سخت می باشد.

کلمات کلیدی: سیستم نوین مهاربندی، مهاربند لوزی شکل، میراگر تسلیم شونده حلقوی، بار چرخه ای، جذب انرژی، شکل پذیری.

۱- مقدمه

تحقیقات زیادی طی دو دهه اخیر بر روی افزایش شکل پذیری مهاربندهای هم محور به انجام رسیده است. علی رغم برخی مزایایی مانند سهولت اجرا و بازسازی، تغییر مکان نهایی آنها باعث نگرانی در مورد کاربرد آنها شده است. علاوه بر این، محدودیت شکل پذیری مهاربندهای هم محور، باعث عملکرد ضعیف آن ها در برابر زلزله شده است [۱ و ۲]. علاوه بر این، مطالعات گوناگونی مانند استفاده از یک المان دایره ای با مواد هایپر الاستیک در قاب خمشی یا مهاربندی به جهت افزایش خاصیت شکل پذیری انجام شده است [۳]. با این حال اکثر این روش ها، به مواد خاص و تکنولوژی برای اجرای مهاربندها احتیاج دارند. بنابراین استفاده از حلقه فولادی بعنوان فیوز کنترلی برای حل این مشکلات پیشنهاد شده است [۴ و ۵] که سبب بهبود شکل پذیری و خاصیت جذب انرژی سیستم می شود [۸-۶].

اولین مطالعات در زمینه میراگرهای فولادی توسط کلی^۲ و اسکینر^۳ انجام شد [۹ و ۱۰]. در مرجع اول [۹] استفاده از میراگرهای فولادی برای بیان هدف از اتلاف انرژی لرزه ای در یک سیستم سازه ای معرفی شده است. این محققین سپس عملکرد سه عدد از این میراگرها را که شامل تغییر شکل های پیچشی و خمشی فولاد می شود بطور دقیق بررسی نمودند. تأکید در این مطالعات بر روی آزمایش قطعه ای بوده است. میراگرها برای تعیین پاسخ سیکلی نیرو-جابجایی و عمر مربوط به خستگی آزمایش شدند. روابط تحلیلی نیز در یک مطالعه اولیه برای

¹ Abaqus

² Kelly

³ Skinner

به کمیت درآوردن رفتار توسعه داده شده است. چان^۴ و آلبرمانی^۵ در سال ۲۰۰۸ [۱۱] پژوهشی را در ارتباط با سیستم جدید جاذب انرژی در ساختمان های فولادی انجام دادند. عملکرد سیستم جاذب انرژی با ۹ آزمایش مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آزمایشات نشان دادند که سیستم جاذب انرژی معرفی شده از شکل پذیری و جذب انرژی خوبی برخوردار است. در تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۸، کافی^۶ با استفاده از حلقه فولادی در مهارندهای هم محور و یا به عبارتی در اعضاء محوری به بررسی آزمایشگاهی و عددی این سیستم مهاربندی پرداخته است که نتایج نشان دهنده مزایای قابل توجه بکارگیری حلقه ها در بهبود رفتار سازه می باشد [۱۲]. از دیگر روش هایی که به منظور افزایش شکل پذیری مهارندهای ضربدری تحقیق شده است، استفاده از یک قاب انعطاف پذیر است که به جای صفحه فولادی میانی، در محل تلاقی مهاربندها تعبیه می شود. این قاب فولادی که دارای اتصالات صلب است، متأثر از نیروهای کششی و فشاری مهاربند تغییرشکل داده و در گوشه های آن مفاصل پلاستیک تشکیل می گردند. تغییرشکل غیرالاستیک قاب موجب می شود که بخشی از انرژی زلزله توسط این قاب جذب شده و در نتیجه شکل پذیری مهاربند افزایش یابد. راکیچویچ^۷ و جوروکوشی^۸ [۱۳] و روفه گری نژاد^۹ و صبوری^{۱۰} [۱۴] با استفاده از این روش، تحقیقاتی را به منظور بررسی عملکرد قاب میانی انجام داده اند. ابعاد قاب میانی در میزان سختی قاب تأثیر مستقیم داشته و افزایش ابعاد آن موجب کاهش سختی آن می شود. معتمدی^{۱۱} و همکاران و پنگ^{۱۲} و همکاران [۱۵ و ۱۶] به بررسی منحنی هیستریزس حلقه فولادی که بعنوان فیوز عمل می کند، پرداختند. نتایج نشان از عملکرد بسیار مناسب حلقه ی انتخاب شده در شکل پذیری و جذب انرژی قاب دارد. بزاز^{۱۳} و همکاران و همچنین عندلیب^{۱۴} و همکاران طی سال های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۵ [۱۷-۲۱] به بررسی رفتار لرزه ای قاب فولادی با مهاربند دروازه ای که المان شکل پذیر حلقه در آن بکار رفته، پرداختند. نتایج نشان دادند که استفاده از حلقه در مهاربند، باعث بهبود شکل پذیری و جذب انرژی قاب می شود. ژائو^{۱۵} و همکاران در سال ۲۰۱۶ به ارائه سیستم مهاربندی نوین با استفاده از حلقه ای از جنس آلیاژ حافظه دار شکلی پرداختند. بدین منظور حلقه ای از جنس SMA را در محل تلاقی مهاربند محور قرار دادند که نتایج حاکی از آن است که استفاده از این سیستم سبب بهبود شکل پذیری و خاصیت استهلاک انرژی شده است [۲۲]. عندلیب و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۲۳] به مطالعه عددی شکل پذیری و جذب انرژی حلقه های فولادی ساخته شده با صفحات انتهایی پرداختند. بدین منظور حلقه های ساخته شده، از دو نیم حلقه تشکیل شدند. در مطالعه آن ها اثرات جوش، پیچ، ضخامت حلقه و خواص مواد بر شکل پذیری و جذب انرژی بررسی گردید که نتایج نشان از عملکرد مناسب حلقه ها داشت. پنگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی لرزه ای رفتار قاب فولادی با مهاربند شورون حاوی حلقه فولادی پرداختند. نتایج نشان دادند که استفاده از حلقه فولادی در مهاربند شورون، سبب بهبود جذب انرژی و شکل پذیری سیستم می شود [۲۴]. خیرالدین^{۱۶} و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی آزمایشگاهی مقاوم سازی قاب بتن مسلح با جکت فولادی و با مهاربند فولادی X شکل و مهاربند فولادی X شکل حاوی حلقه فولادی پرداختند. بر روی تمامی نمونه ها باگذاری چرخه ای اعمال شد. نتایج نشان دادند 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 که قاب تنها باشد، شده است. اما بطور کلی علی رغم اندکی کاهش در مقاومت، اما میزان جذب انرژی و شکل پذیری سیستم با حلقه نسبت به سیستم مهاربندی بدون حلقه بیشتر بوده است [۲۵].

با مطالعه تحقیقات اخیر در زمینه استفاده از سیستم میراگرها در مهاربندها از جمله استفاده از حلقه فولادی، مشخص گردید که عمده تحقیقات بدین شکل است که حلقه جانمایی شده در درون مهاربند، عملکردی سری داشته است و ظرفیت نهایی و شکل پذیری سیستم بطور مستقیم وابسته به ظرفیت حلقه می باشد. بنابراین در صورت احتیاج به ظرفیت های بالا، می بایست از حلقه ای بزرگ تر و ضخیم تر استفاده

⁴ Chen

⁵ Albermani

⁶ Kafi

⁷ Rakicevic

⁸ Jurukovshi

⁹ Roufegarinejad

¹⁰ Sabouri

¹¹ Motamedi

¹² Peng

¹³ Bazzaz

¹⁴ Andalib

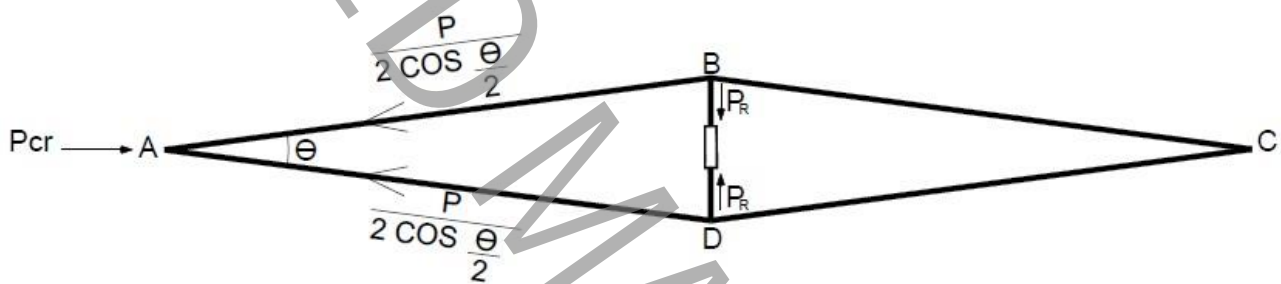
¹⁵ Gao

¹⁶ Kheyroddin

نمود تا بتواند نیازهای طراحی و اجرا را تأمین نماید. بنابراین در این مقاله سیستم نوینی ارائه می شود که ضمن معرفی یک سیستم مهاربندی جدید با قابلیت تعمیرپذیری، ظرفیت کلی مهاربند بطور مستقیم وابسته به ظرفیت حلقه نبوده، بلکه بتواند از حلقه ای با ظرفیت مشخص و به کمک سختی و مقاومت مجموعه ای از المان های اصلی و فرعب مهاربند، ظرفیت نهایی چندین برابر را برای مهاربند تعبیه نماید. همچنین می بایست با وجود حلقه، شکل پذیری و جذب انرژی مهاربند را نیز تأمین نماید. بدین منظور آزمایشات چرخه ای بر روی مهاربندها با اتصالات ساده، سخت و نیمه سخت انجام می شود و عملکرد سیستم پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می گیرد. در نهایت نیز جهت بررسی قابلیت مدل سازی سیستم پیشنهادی در نرم افزارهای المان محدودی، یکی از مدل های آزمایشگاهی به کمک نرم افزار ABAQUS، مدل سازی شده و صحت سنجی می شود.

۲- مبانی نظری

سیستم پیشنهادی ارائه شده در این مقاله صرفاً منحصر به استفاده از یک حلقه فولادی بعنوان یک میراگر نمی شود. لذا هر المان یا ساختاری که بتواند نقش جاذب انرژی و تأمین شکل پذیری را ایفا نماید (حلقه - فنر - میراگر - المان های ترکیبی و...)، می تواند در سیستم پیشنهادی ارائه شده بخوبی نقش خود را ایفا نماید. لذا با توجه به سهولت دسترسی و ارزان بودن استفاده از حلقه فولادی و به نوعی مقایسه با کارهای مشابه انجام شده، حلقه فولادی با مشخصات مورد نظر تهیه و آماده سازی شد. در شکل ۱ تصویر کلی سیستم پیشنهادی ارائه شده است.



شکل ۱: هندسه کلی سیستم پیشنهادی

ظرفیت حلقه مورد نظر به کمک رابطه (۱) و ظرفیت سیستم مهاربندی به کمک رابطه (۲) قابل محاسبه می باشد.

$$P_R = \frac{t^2 \cdot L}{R} \sigma \quad (1)$$

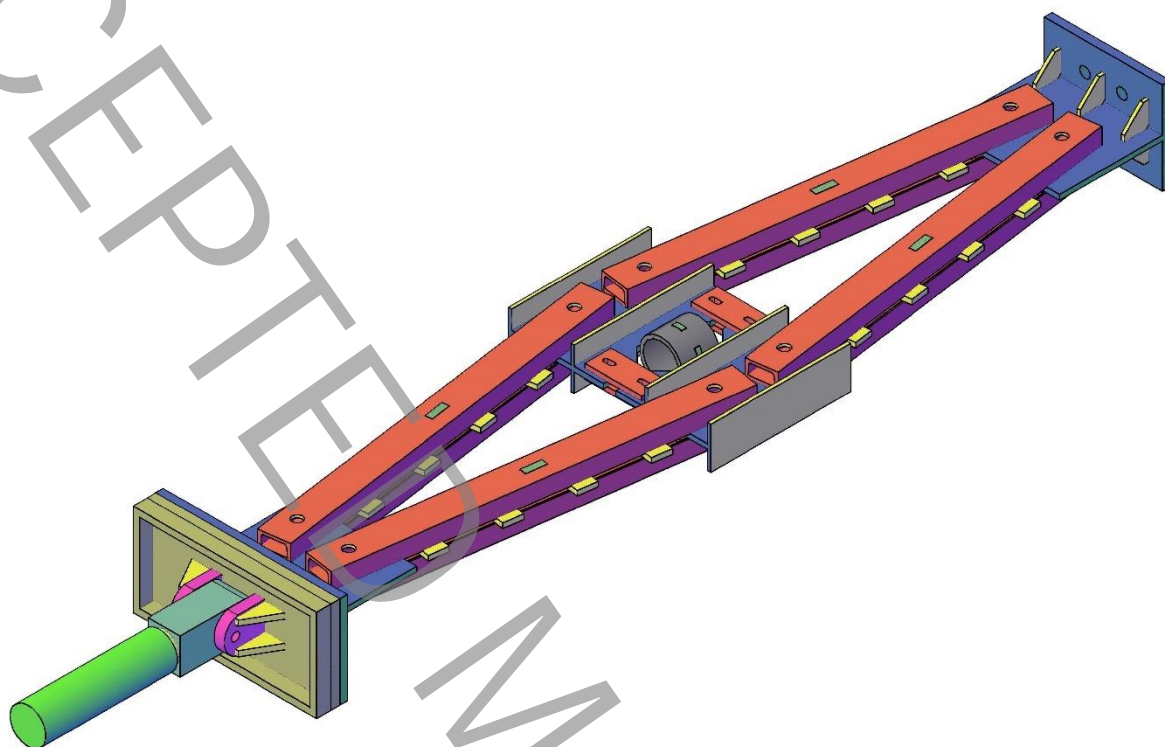
$$P_{cr} = \frac{P_R}{\tan \frac{\theta}{2}} \quad (2)$$

که در رابطه (۱)، t ، L و R به ترتیب عبارتند از ضخامت، طول و شعاع متوسط حلقه. همچنین σ برابر است با تنش فولاد استفاده شده در حلقه می باشد که برای داده های آزمایشگاهی می بایست از مقدار تنش تسلیم (σ_y) استفاده نمود و برای نرم افزار از مقدار تنش نهایی (σ_u).

۳- برنامه آزمایشگاهی

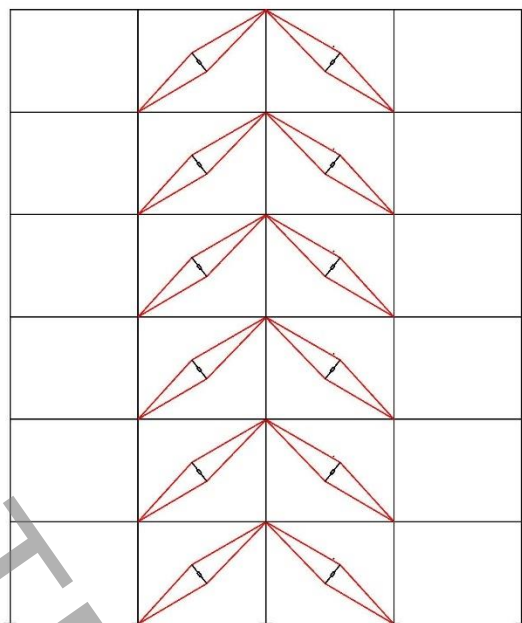
۳-۱- معرفی سیستم پیشنهادی

سیستم پیشنهادی بدین صورت است که عضو مهاربند بصورت لوزی شکل مطابق شکل ۲ می باشد که در وسط آن میراگر تسلیم شونده حلقوی قرار گرفته است. ترکیب این سیستم به گونه ای است که ظرفیت نهایی سیستم مهاربندی ارتباط مستقیم با میراگر نداشته و از میراگری با ظرفیت مشخص، می توان سیستمی با ظرفیت چندین برابر ارائه داد که این مطلب به راحتی با روابط استاتیک و مقاومت مصالح قابل اثبات می باشد.



شکل ۲: نمای سه بعدی سیستم پیشنهادی

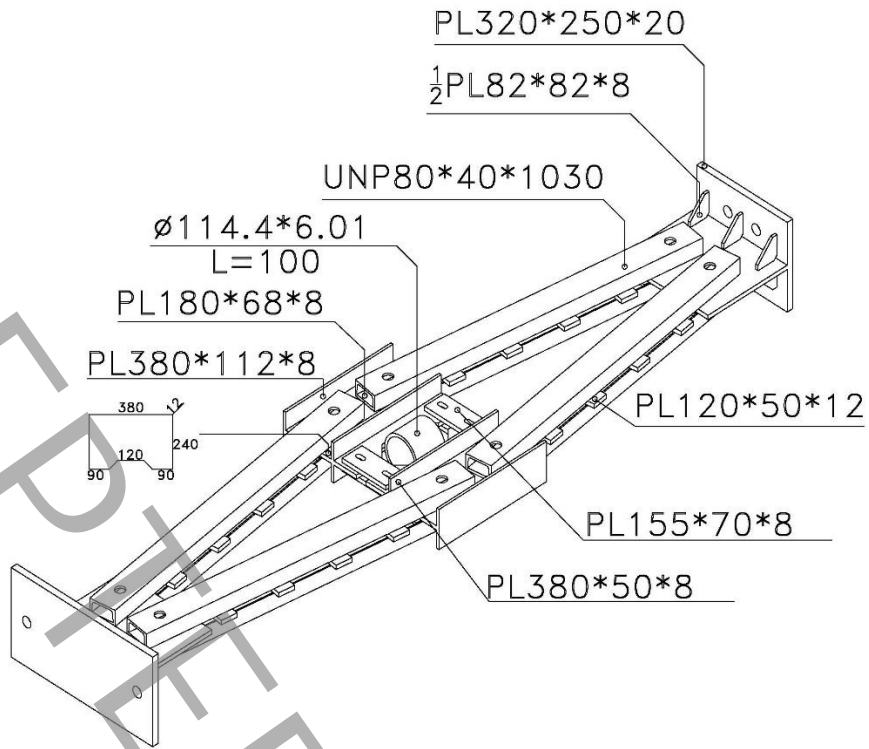
همچنین نحوه جانمایی مهاربند پیشنهادی در شکل ۳ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می شود، مهاربند موردنظر بصورت هم محور در دو دهانه با عملکرد کششی-فشاری رفتار می کند.



شکل ۳: نحوه جانمایی مهاربند لوزی شکل پیشنهادی در قاب

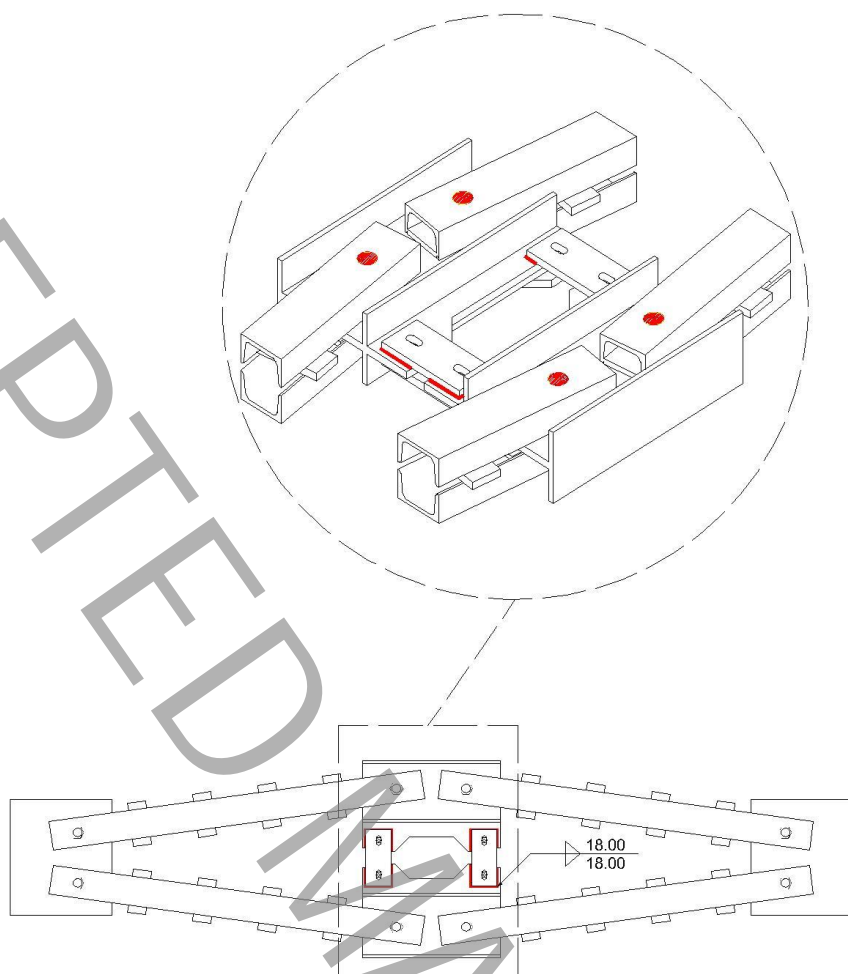
۳-۲- جزئیات برپایی آزمایش

در این مطالعه ۳ نوع مهاربند با انواع اتصالات ساده، سخت و نیمه سخت تحت آزمایش چرخه ای قرار گرفتند. اتصالات، جزئیات هندسی و ابعادی تمامی اجزاء مهاربند به ترتیب در شکل ۴ آورده شده اند. اعضای تشکیل دهنده این سیستم شامل ورق ناودانی، صفحات فولادی، پیچ و مهره و حلقه فولادی می باشد. تفاوت مدل سخت، نیمه سخت و ساده در وجود و یا عدم وجود حلقه در سیستم و نوع اتصالات ناودانی ها با سایر اعضای مهاربند می باشد. در مدل سخت و ساده حلقه فولادی بکارگیری شده است که در اتصال سخت ناودانی ها به وسیله پیچ و جوش به ورق اتصال مرکزی متصل شده اند و در اتصال ساده نیز ناودانی ها تنها بصورت پیچ و مهره از نوع معمولی به ورق اتصال مرکزی سیستم متصل شده اند. در مدل نیمه سخت نیز اتصالات ناوانی همانند اتصال ساده می باشد با این تفاوت که حلقه فولادی در سیستم بکارگیری نشده است و بجای آن اتصال دو ورق متصل کننده سیستم بصورت جوش سرتاسری می باشد. شکل ۵ برای نمایش هرچه بهتر تفاوت مدل ها ارائه شده است. همچنین در شکل ۶ نیز نمونه ساخته شده یکی از مدل ها نشان داده شده است. لازم به ذکر است که محل جانمایی، قطر و مشخصات پیچ ها مطابق AISC358-16 [۲۶] تعیین گردید. تمامی پیچ و مهره های بکار رفته با نمره ۲۷، طول ۱۵ سانتی متر و رده مقاومتی 10.9 بصورت فورج سرد تولید و مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل ۴: مشخصات ابعادی قطعات بکار رفته در مهاربند

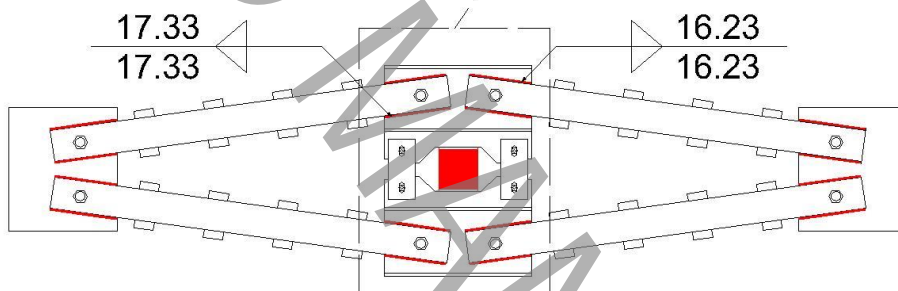
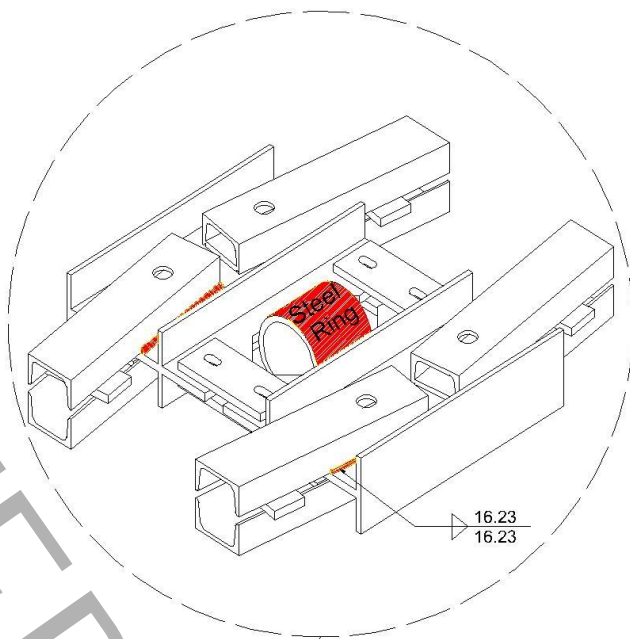
ACCEPTED



الف) مدل نیمه سخت

MANUSCRIPT

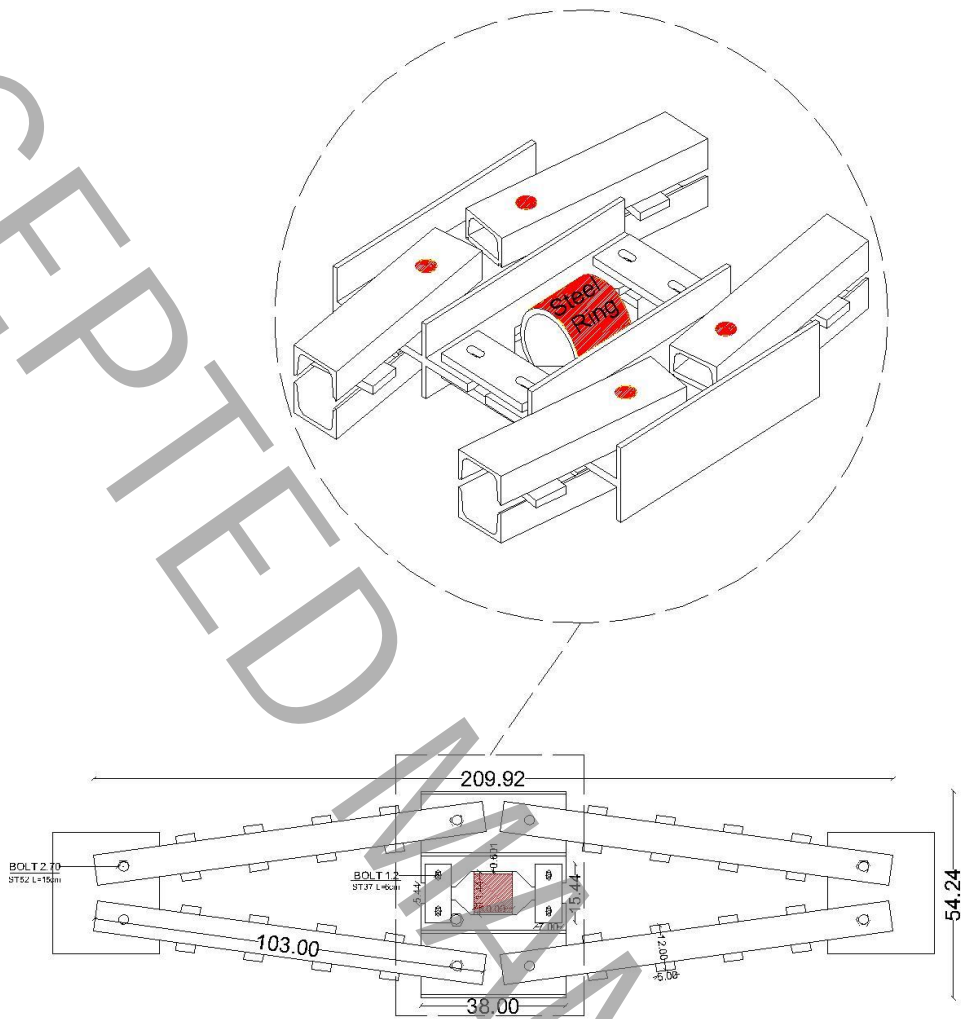
ACCEPTED



(ب) مدل سخت

MANUSCRIPT

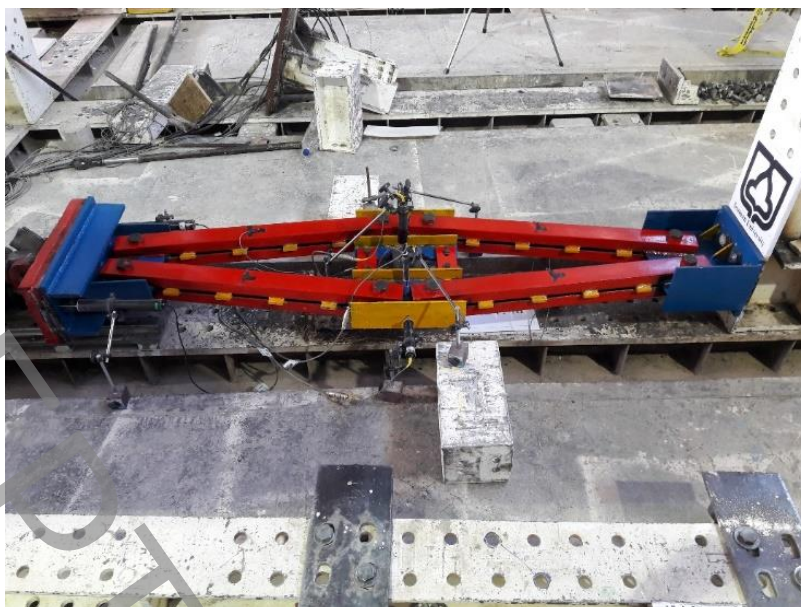
ACCEPTED



ج) مدل ساده

شکل ۵: تفاوت سه مدل نیمه سخت، سخت و ساده

MANUSCRIPT



شکل ۶: نمای کلی مهاربند پیشنهادی پس از ساخت

در اشکال ۴ و ۵ جزئیات دقیق مدل ها ارائه شدند اما به منظور جمع بندی کلی، مشخصات سه مدل پیشنهادی بطور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱: مشخصات مدل های پیشنهادی

اجزاء اصلی تشکیل دهنده							نام مدل	
برشگیرها و سخت کننده‌ها	اتصال جوشی در مهاربند	اتصال پیچ و مهره در مهاربند	المان لینک جوشی	اتصال جوشی حلقه با مهاربند	حلقه فولادی	ناودانی		
✓	-	✓	-	✓	✓	✓	Hinge	ساده
✓	✓	-	-	✓	✓	✓	Rigid	صلب
✓	-	✓	✓	-	-	✓	Semi Rigid	نیمه سخت

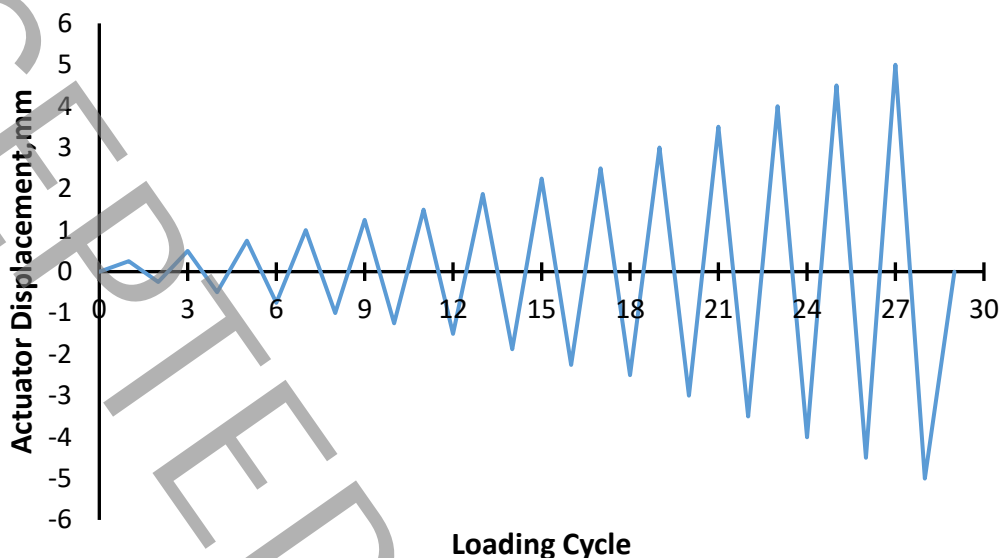
نکته قابل تأمل در این مدل ها، ایجاد زاویه کم ($15/6$ درجه) بین عضو لوزی شکل می باشد. در این طرح تلاش شده تا با در نظر گرفتن محدودیت های اجرایی، حداقل زاویه ممکن بین اعضا ایجاد شود تا پتانسیل کماتش کلی سیستم به حداقل برسد. همچنین با توجه به آزمایش کشش انجام شده بر روی ورق های ناودانی و صفحات در آزمایشگاه مهندسی مواد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پارامترهای بدست آمده در جدول ۲ آورده شده اند. که این مقادیر علاوه بر شناخت دقیق رفتار مصالح بکار رفته در ساخت نمونه ها، در معرفی مشخصات مصالح در نرم افزار نیز استفاده خواهد شد. استاندارد آزمایش ورق ناودانی و صفحات فولادی به ترتیب عبارتند از BS EN 10025-2 Grade S235 J2 و BS EN 10025-2 Grade S335 J2. همانطور که ملاحظه می شود تمامی مشخصات مصالح بکار رفته در ساخت مهاربند در محدوده استاندارد قرار دارند.

جدول ۲: آزمایش کشش بر روی فولادهای مصرفی

تنش شکست (مگاپاسکال)		تنش تسلیم (مگاپاسکال)		کرنش شکست (%)		استاندارد	مصالح
آزمایش	استاندارد	آزمایش	استاندارد	آزمایش	استاندارد		
۳۴۹	۳۴۰-۵۱۰	۲۴۵	بزرگتر از ۲۲۵	۴۰	بزرگتر از ۲۴	BS EN 10025-2 Grade S235 J2	ورق ناودانی
	۴۰۰-۵۵۰		بزرگتر از ۲۵۰		بزرگتر از ۲۰		
۵۷۱	۴۷۰-۶۳۰	۳۶۵	بزرگتر از ۳۴۵	۲۹	بزرگتر از ۲۲	BS EN 10025-2 Grade S335 J2 و	صفحات فولادی
	۴۰۰-۵۵۰		بزرگتر از ۲۵۰		بزرگتر از ۲۰		

۳-۳- بارگذاری

بارگذاری مورد استفاده در این تحقیق بر اساس استاندارد ATC-24 [۲۷] می باشد که در شکل ۷ نشان داده شده است. بارگذاری تا چرخه سیام و تغییرمکان ۵ میلی متر در نظر گرفته شد که سیستم موردنظر تا تغییرمکان حدود ۰/۵ میلی متر تسلیم می شود اما بارگذاری از تغییرمکان ۰/۲۵ میلی متر آغاز شد. همچنین تا چرخه پانزدهم بصورت ۳ سیکل و از آن به بعد بصورت ۲ سیکل ادامه می یابد.



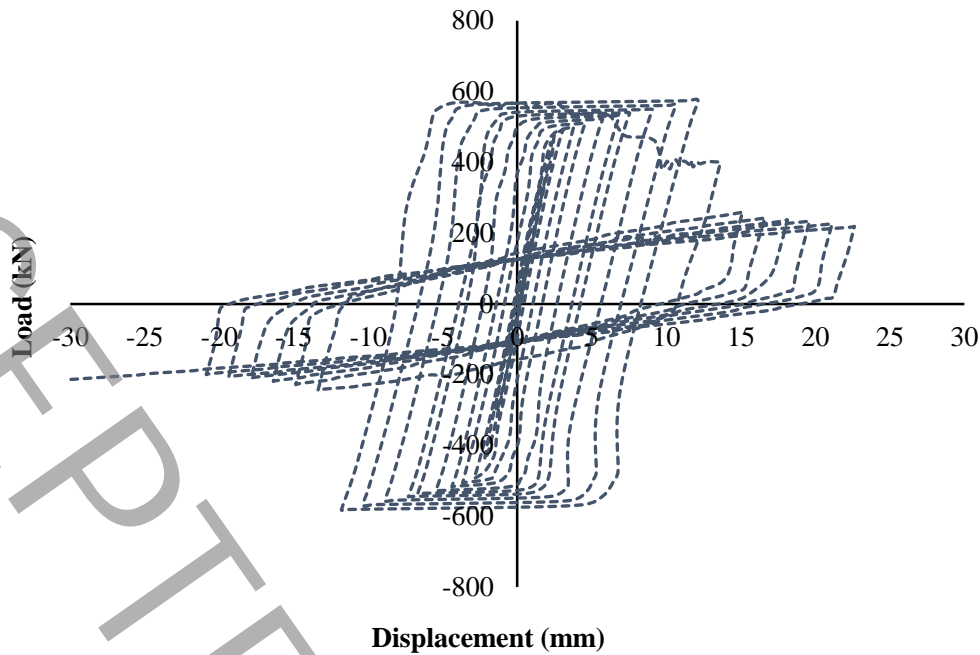
شکل ۷: بارگذاری چرخه ای مورد استفاده در آزمایش ها

۴- نتایج آزمایشگاهی و بررسی آنها

با انجام آزمایش های چرخه ای بر روی سه نمونه سخت ، نیمه سخت و ساده ، نتایجی همچون منحنی های نیرو-تغییرمکان، حداکثر نیروی واردشده، سختی، جابجایی و مد خرابی حاصل شده است که در ادامه به آنها پرداخته می شود. با توجه به عدم وجود حلقه در مدل نیمه سخت، ابتدا به بررسی نتایج این سیستم به عنوان سیستم پایه پرداخته می شود و در ادامه بررسی دو سیستم دیگر و معرفی سیستم پیشنهادی نهایی به انجام می رسد.

۴-۱- نمونه نیمه سخت

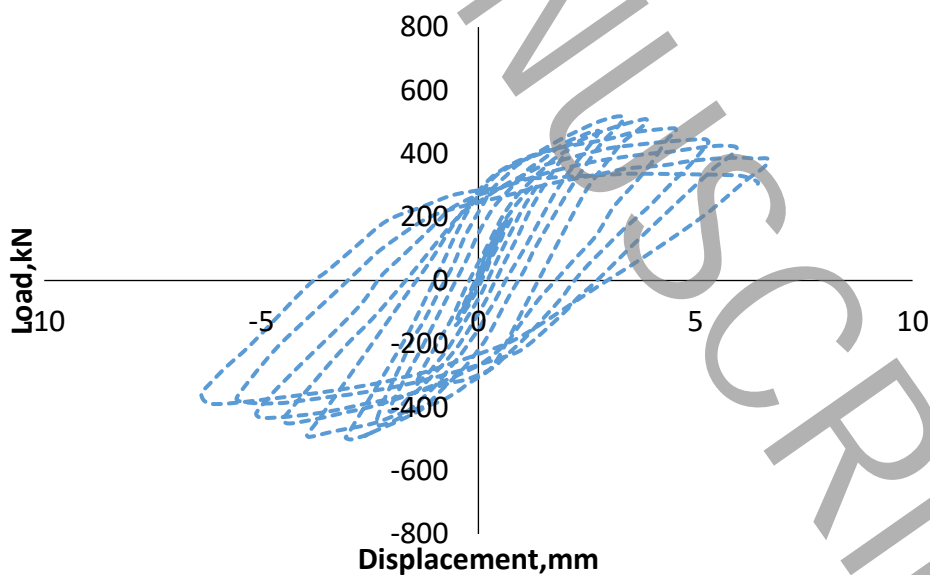
منحنی نیرو-تغییرمکان بدست آمده از نتایج آزمایش بر روی سیستم نیمه سخت که فاقد میراگر تسلیم شونده می باشد، در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به عدم وجود میراگر در این نمونه، بارگذاری تا زمان گسیختگی عضو مهاربند ادامه یافته است و در نهایت با کمانش ناودانی، آزمایش به پایان رسیده است که بیشینه نیروی وارده به بیش از ۶۰ تن می رسد. همچنین جذب انرژی بالای سیستم که در حدود ۴۴۰۰ تن-میلی متر است، از جمله دستاوردهای حائز اهمیت سیستم پیشنهادی می باشد. نتایج ارائه شده در شکل ۸ نشان دهنده عملکرد بسیار مناسب سیستم پیشنهادی در حالت کلی و قابلیت سیستم برای بکارگیری بعنوان عضو مهاربندی در سیستم های مهاربندی می باشد، اما از طرفی با توجه به کمانش اعضای سیستم و همچنین وارد شدن اعضای مهاربندی به فاز غیرالاستیک، نیاز به گسترش و تکمیل نمودن سیستم به وسیله یک فیوز تسلیم شونده دارای اهمیت بسیاری می باشد. بنابراین در ادامه دو مدل سخت و ساده سیستم پیشنهادی به همراه حلقه فولادی تسلیم شونده در راستای ارتقاء عملکرد سیستم پیشنهادی نیز مورد بحث و بررسی قرار می گیرند.



شکل ۸: منحنی هیستریزیس مدل نیمه سخت

۲-۴- نمونه سخت

با توجه به توضیحات بخش قبل، در این مدل با اضافه کردن میراگر حلقوی تسلیم شونده به سیستم و برقراری اتصال سخت در هسته مرکزی سیستم و انجام آزمایش چرخه ای بر روی آن، منحنی نیرو-تغییر مکان بصورت شکل ۹ حاصل شده است. بررسی نتایج نشان می دهد که این سیستم نیز از طرفیت و جذب انرژی مناسبی برخوردار می باشد، اما بررسی مد خرابی این سیستم نشان از جاری شدن حلقه فولادی و کمانش عضو مهاربند بصورت همزمان داشته و تمامی اهداف در نظر گرفته شده برای این سیستم را در بر نمی گیرد. در شکل ۱۰ نمایی از کمانش اعضای مهاربند مشاهده می شود. بنابراین این سیستم نیاز به اصلاحاتی در راستای الاستیک ماندن تمامی اعضای مهاربندی و تنها مفصل شدن و جاری شدن میراگر تسلیم شونده دارد.



شکل ۹: منحنی هیستریزیس مدل سخت

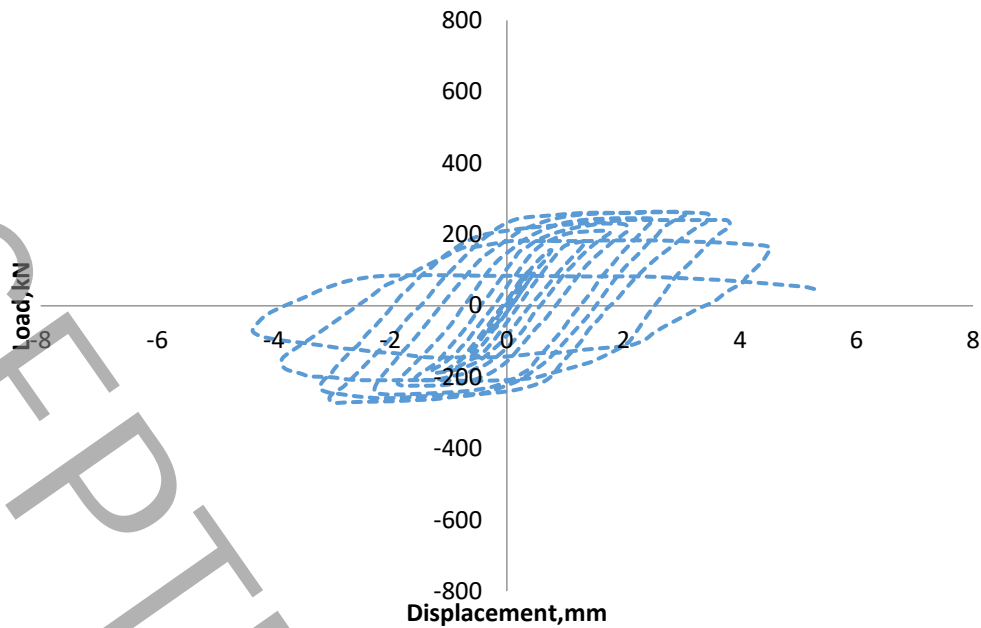


شکل ۱۰: کماتش اعضای مهاربند

۳-۴- نمونه ساده

با توجه به نحوه عملکرد مدل سخت، با تغییراتی در نحوه اتصال و مفصلی کردن تمامی اتصال بین اعضای مهاربندی و صفحات میانی و میراگر، مدل تکمیلی در جهت پوشش محدودیت های و معایب مدل سخت و ارائه یکی سیستم در جهت دارا بودن قابلیت تعمیرپذیری، ظرفیت باربری و شکل پذیری مناسب، مدل ساده نیز مورد آزمایش قرار گرفته است که منحنی نیرو-تغییر مکان در شکل ۱۱ مشاهده می شود. بررسی مد خرابی این سیستم نشان از جاری شدن میراگر حلقوی در مرکز سیستم و باقی ماندن سایر اعضای مهاربند در فاز الاستیک می دهد. بنابراین سیستم ساده پیشنهادی ضمن عمل کردن صحیح و مورد نظر این پژوهش و کارایی لازم در جهت برآورده شدن اهداف مطرح شده، قابلیت اتکا و بررسی بیشتر برای استفاده در صنعت ساختمان را دارا می باشد. مهم ترین نکته حائز اهمیت در این مدل این است که بدلیل گسیختگی میراگر و باتوجه به معیارهای جک آزمایشگاهی برای به پایان رساندن، آزمایش به پایان رسیده است اما در شرایط واقعی بدلیل الاستیک باقی ماندن المان های مهاربند، این سیستم همچنان قابلیت بارگذاری را دارد. همچنین نحوه و محل خرابی حلقه، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، خرابی حلقه در کنار محل جوشکاری شده که بیشترین مفاصل پلاستیک تشکیل می شود، رخ داده است.

در ادامه به منظور ارزیابی عملکرد سیستم های معرفی شده بصورت کلی، مقایسه آن با یکدیگر و بررسی مزایا و معایب هر یک، سه مدل سخت، نیمه سخت و ساده مورد مقایسه قرار خواهند گرفت.



شکل ۱۱: منحنی هیستریزیس مدل ساده



شکل ۱۲: خرابی در حلقه

۵- مقایسه سه مدل پیشنهادی با یکدیگر

پس از انجام آزمایشهای چرخه ای، نمودارهای هیستریزیس هر سه نمونه سخت، نیمه سخت و ساده بدست آمده است که در شکل ۱۳ ارائه شده است. با توجه به منحنی های نیرو-تغییر مکان ارائه شده، مشاهده می شود که سیستم پیشنهادی سه نمونه دارای عملکرد مناسبی بوده و کارایی لازم در جهت اجرایی شدن و درست عمل کردن را دارد. با استفاده از منحنی های نیرو-تغییر مکان بدست آمده، بیشترین اتلاف انرژی، بیشترین بار اعمال شده، بیشترین جابجایی و سختی هر سه نمونه حاصل می شود که خلاصه نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می شود، مدل با اتصال ساده، به دلیل حضور حلقه و اتصالات ساده دارای بیشترین ضریب شکل پذیری می باشد. همچنین برای مقایسه هر چه بهتر عملکرد سه نمونه، منحنی های انرژی تجمعی-سیکل و نیرو-تغییر مکان در هر سیکل در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می شود، مدل با اتصال نیمه سخت برخلاف دو مدل دیگر در هر چرخه با افزایش جذب انرژی همراه بوده، به نحوی که در آخرین سیکل آزمایش و قبل از گسیختگی، دارای بیشترین جذب انرژی می باشد. همچنین با بررسی نمودار نیرو-تغییر مکان نیز مدل با اتصال نیمه سخت دارای ظرفیت و جابجایی بیشتری نسبت به دو مدل با اتصال سخت و ساده می باشد و روند افزایشی در هر چرخه نیز در مدل نیمه سخت مشاهده می شود.

با بررسی اولیه نتایج و نمودارهای اشاره شده، مشخصاً مدل نیمه‌سخت دارای ظرفیت جذب انرژی و باربری بیشتری نسبت به دو مدل دیگر می‌باشد، اما همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، هدف مهم در این مقاله، ارائه سیستمی می‌باشد که ضمن اجرایی بودن و داشتن ظرفیت مناسب باربری، جذب انرژی و شکل پذیری بالا، قابلیت تعمیرپذیری را نیز داشته باشد. بنابراین مدل ساده کارایی و قابلیت مناسب تری نسبت به دو مدل دیگر داشته و اهداف تعیین شده در ارائه این سیستم جدید را بطور کامل فراهم می‌نماید. بطور خلاصه ویژگی‌های مدل ساده نسبت به دو مدل دیگر عبارت‌اند از:

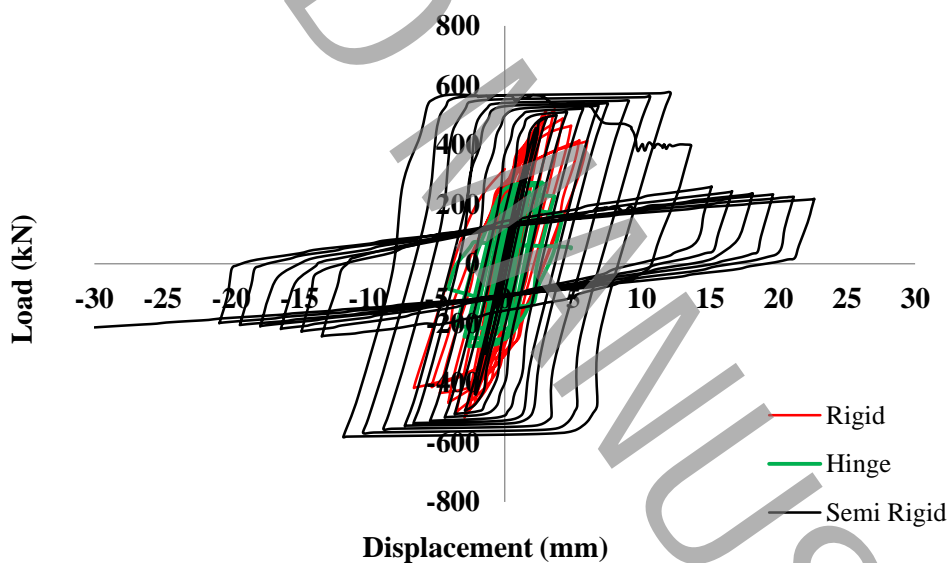
- در مدل ساده میراگر جاری شده و گسیخته می‌شود و سایر اعضا در ناحیه الاستیک باقی می‌مانند، در صورتی که در دو مدل دیگر المان‌های مهاربند نیز وارد فاز غیرخطی شده و دچار کمانش شده‌اند. بنابراین مستقیماً از ظرفیت تمامی اعضای مهاربند در دو مدل نیمه‌سخت و سخت استفاده شده است و پس از گسیختگی و اتمام آزمایش، قابلیت بارگذاری مجدد در آنها وجود نداشته و سیستم بطور کلی گسیخته شده است.

- قابلیت تعمیرپذیری فقط در مدل ساده وجود دارد.

- در مدل ساده با توجه به میزان بار موجود، می‌توان تنها با استفاده از افزایش ضخامت حلقه‌های تسلیم شونده، به ظرفیت‌های باربری و جذب انرژی بالاتری رسید در صورتی که در سایر سیستم‌ها بدلیل جاری شدن سایر اعضا می‌بایست کل سیستم مورد تغییر و طراحی قرار گیرد.

- سیستم ساده دارای ویژگی ادامه پذیرش بار پس از اتمام آزمایش می‌باشد.

- درست عمل کردن عضو لوزی شکل مهاربندی و میراگر تسلیم شونده حلقوی و عمل کردن میراگر بعنوان فیوز تنها در سیستم ساده به انجام رسیده است.

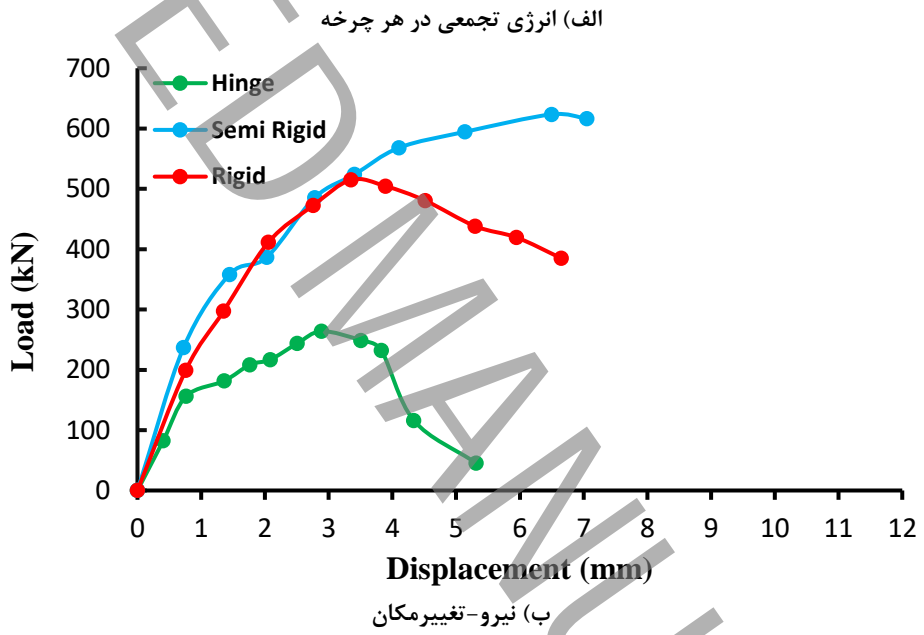
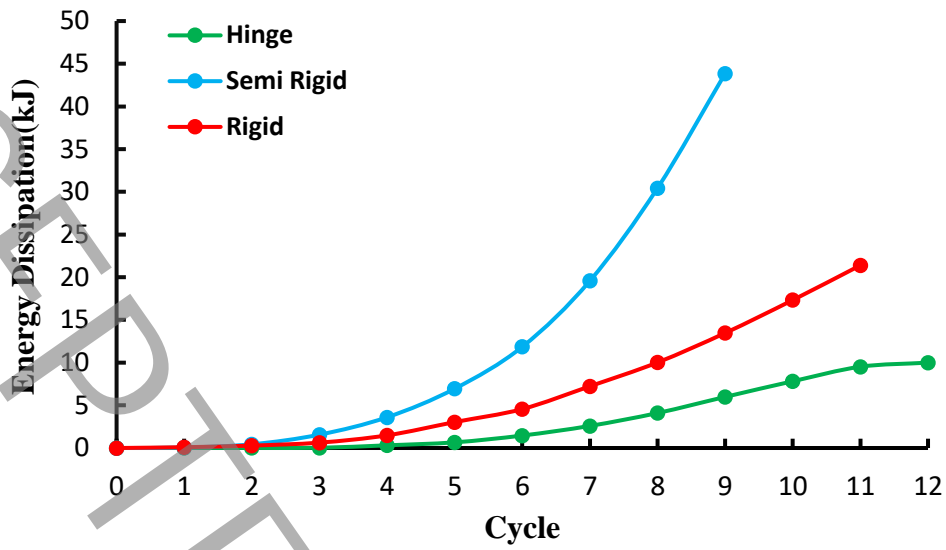


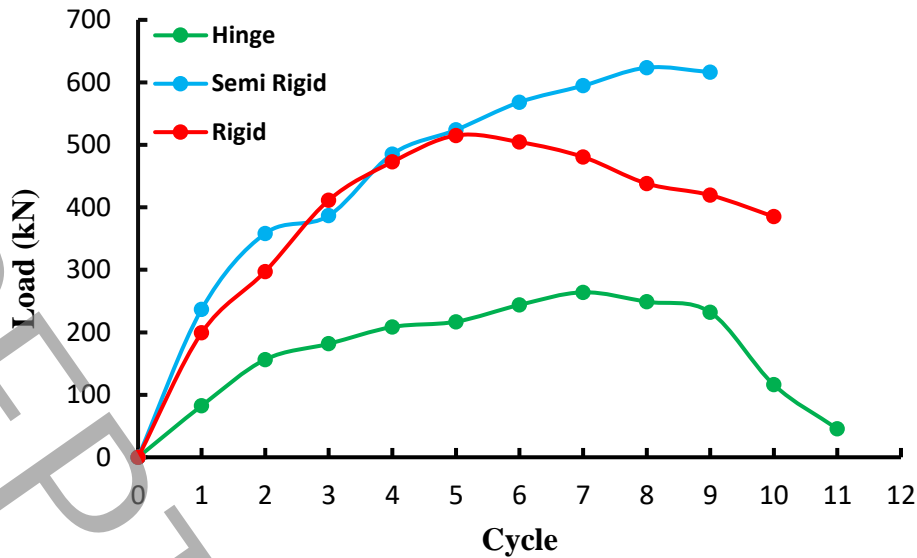
شکل ۱۲: مقایسه منحنی‌های هیستریزیس ۳ مدل پیشنهادی

جدول ۳: خلاصه نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها

سخت	نیمه‌سخت	ساده	
۵۱۷/۷	۶۲۳/۵	۲۶۴	ماکزیمم بار (kN)
۶/۳	۷/۱	۵/۳	ماکزیمم تغییر مکان (mm)
۲۱/۳۹	۴۳/۸۶	۹۴/۹۴	انرژی تلف شده (kJ)
۸۲/۱	۸۷/۹	۵۵/۵	سختی اولیه (kN/mm)
۱۹۹/۱۱	۲۳۶/۷۶	۱۵۶/۳۷	تنش تسلیم (kN)

۵۱۷/۷۰	۶۲۳/۵۳	۲۶۳/۹۸	تنش نهایی (kN)
۴/۴۱	۴/۲	۴/۹	ضریب شکل پذیری





ج) مقادیر بار در هر چرخه

شکل ۱۴: نحوه عملکرد سه نمونه در هر چرخه

۶- مقایسه نتایج با سایر سیستم های لرزه ای نوین ارائه شده

با توجه به بررسی های انجام شده و انتخاب مدل ساده به عنوان مدل اصلی در این تحقیق، انجام مقایسه سیستم پیشنهادی با سایر سیستم های نوین مهاربندی دارای اهمیت و ضرورت می باشد. بنابراین در این بخش به بررسی و مقایسه اجمالی سیستم نوین پیشنهادی با سایر سیستم ها پرداخته می شود.

کافی و همکاران [۱۲] با استفاده از عضو شکل پذیر در مهاربندهای هم محور به کاربرد این سیستم در افزایش جذب انرژی پرداخته اند. در این سیستم که از حلقه فولادی به قطر خارجی ۲۲، ضخامت ۱/۲ و همچنین طول ۱۰ سانتی متر استفاده شده است، ظرفیتی در حدود ۸ تن در حلقه و در کل مهاربند (مهاربند بصورت سری عمل کرده است) ایجاد شده است. عندلیب و همکاران [۱۷-۲۱] طی تحقیق آزمایشگاهی و عددی به ارزیابی استفاده از حلقه فولادی به عنوان فیوز در سیستم off-center bracing پرداخته اند. در این تحقیق از حلقه ای به قطر و ضخامت ۲۰ و ۲ سانتی متر استفاده شده است. بررسی مدخرابی نشان دهنده جاری شدن حلقه فولادی با ظرفیت نیرویی در حدود ۱۰۰ kN و باقی ماندن سایر اعضا در ناحیه خطی می باشد.

Gao و همکاران [۲۲] با ترکیب ۴ کابل کششی و حلقه SMA با قطر ۲۵ سانتی متر و ضخامت ۵٫۷ سانتی متر سیستم مهاربندی جدیدی را معرفی کرده و مورد ارزیابی قرار داده اند. در این سیستم با عملکرد سری کابل ها و حلقه SMA ظرفیتی معادل ۱۶۰ kN حاصل شده است. بررسی مطالعات سیستم های نوین پیشنهادی در تحقیقات گذشته علاوه بر داشتن ویژگی ها و محاسن خاص خود، دارای ضعف های مشترکی می باشند که نیازمند ارائه سیستمی جدید در راستای پوشش این ضعف ها و محدودیت ها دارای اهمیت بسیاری می باشد. از جمله محدودیت ها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ❖ پس از گسیختگی المان شکل پذیر، سیستم به طور کامل گسیخته می شود و در عمل سیستم قابلیت ادامه کار و گرفتن ظرفیت بیشتر نیرو را نخواهد داشت.
- ❖ عملکرد المان شکل پذیر با اعضای مهاربندی بصورت سری بوده و در برخی مواقع نیز منجر به غیرخطی شدن اعضای مهاربندی می شود.
- ❖ استفاده از حلقه هایی با قطر و ضخامت زیاد در راستای افزایش ظرفیت اعمال نیرو و اقتصادی نبودن آنها.
- ❖ محدودیت های اتصال عضو شکل پذیر به المان های مهاربندی.
- ❖ محدودیت های اجرایی.

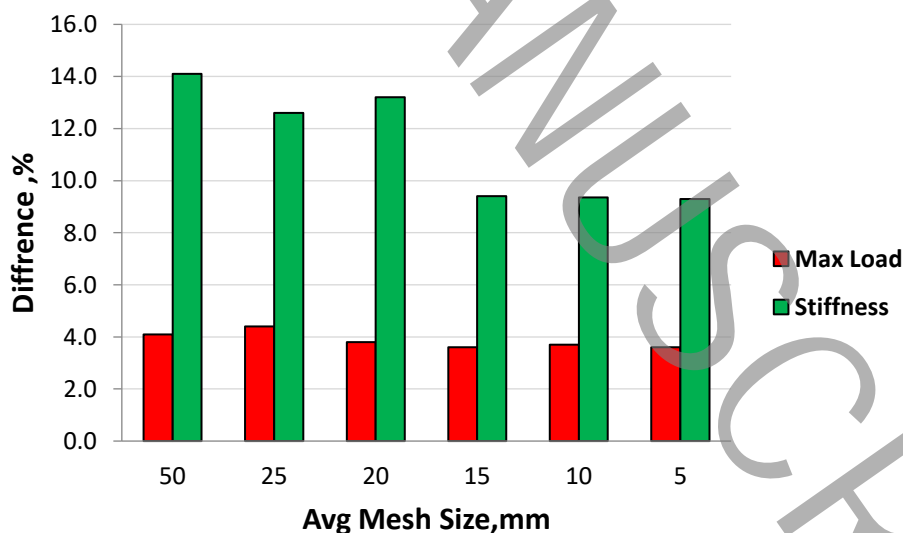
با توجه به محدودیت های اشاره شده در تحقیقات قبلی و با بررسی جزئیات هندسی سیستم پیشنهادی در این تحقیق و همچنین نتایج بدست آمده از آن مشاهده می شود که با قطر و ضخامت مشخصی از حلقه فولادی، ظرفیت بار بیشتری برای مهاربند لوزی شکل نسبت به سایر مهاربندهای رایج حاصل شده است که ضمن قابلیت تعمیرپذیری حلقه فولادی، قابلیت ادامه کار سیستم و عدم فروریزش آن پس از گسیختگی حلقه فولادی نیز وجود دارد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که سیستم پیشنهادی به لحاظ کارایی و اقتصادی از قابلیت مناسب تری نسبت به سایر سیستم ها داشته و شایسته بررسی های بیشتر در راستای بکارگیری آن در صنعت ساخت و ساز و اجرایی شدن آن می باشد.

۷- مدلسازی عددی

همانطو که اشاره شد در این پژوهش سه نمونه مهاربند با عملکرد ساده، نیمه سخت و سخت مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور امکان سنجی مدلسازی نمونه های آزمایشگاهی در نرم افزارهای عددی، مدل سخت تحت بارگذاری مشابه نمونه آزمایشگاهی قرار می گیرد. به منظور مدل سازی اعضاء مختلف مدل برای بخش عضو مهاربندی و ورق های اتصال از المان Solid و برای مدل سازی حلقه و ورق اتصال از المان پوسته (Shell) استفاده شده است. همچنین شرایط مرزی و بارگذاری به طور کلی تعیین کننده تکیه گاه های مدل، تقارن، تغییر مکان ها و نیروهای اعمالی به مدل می باشد. نیروی اعمالی به مدل به صورت کنترل-تغییر مکان و پروتکل بارگذاری اعمالی نیز مشابه نمونه آزمایشگاهی با پروتکل بارگذاری بر حسب ATC-24 [۲۷] قرار گرفتند. المان در نظر گرفته شده به منظور مش بندی، C3D8R بوده که المان مکعبی سه بعدی ۸ گره ای با سختی کاهش یافته می باشد. برای بخش های با المان پوسته (Shell) نیز از المان S4R استفاده شده است.

۷-۱- آنالیز حساسیت مش

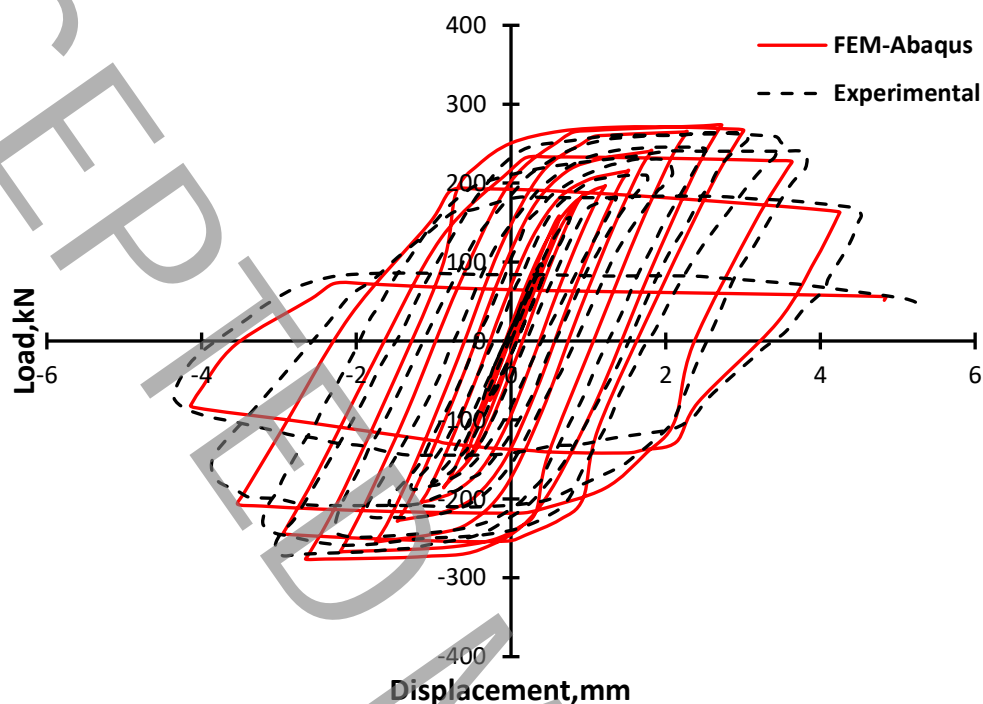
به منظور آنالیز حساسیت مش، ظرفیت و سختی مدل ساده برای اندازه های مختلف مش به دست آمد و نتایج آن با نتایج مدل های آزمایشگاهی مقایسه گردید. در شکل ۱۵ خطای ایجاد شده در مدل مقادیر ظرفیت و سختی برای مدل ساده نسبت به مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با کاهش اندازه مش از ۱۵ میلی متر تاثیر چندانی در کاهش خطا دیده نمی شود و تنها زمان پردازش مدل افزایش می یابد. از این رو در مدل های این بخش از مش با اندازه متوسط ۱۵ میلی متر استفاده شده است.



شکل ۱۵: آنالیز حساسیت مش

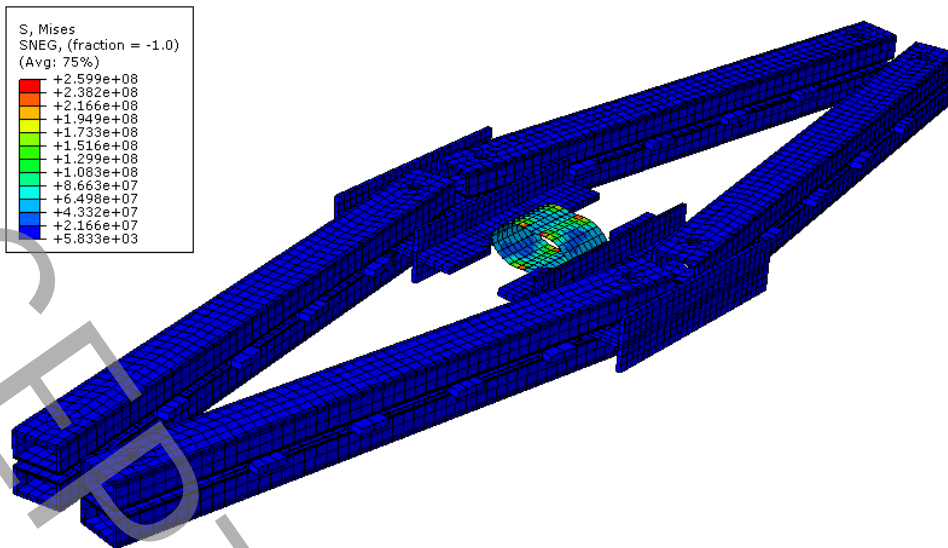
۷-۲- نتایج عددی

نتایج بدست آمده از مدل المان محدودی و مقایسه آن با نمونه آزمایشگاهی مدل ساده در شکل ۱۶ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می شود، هماهنگی مناسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برقرار است که نشان دهنده توانایی نرم افزارهای المان محدودی در مدلسازی مدل پیشنهادی می باشد.



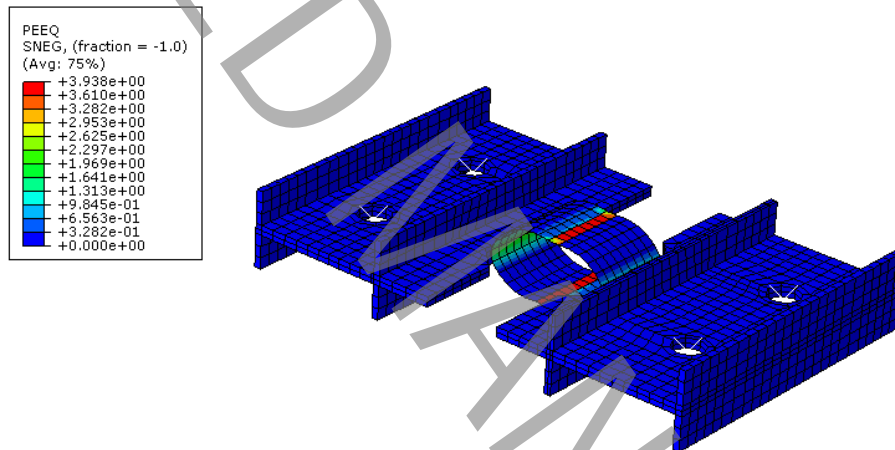
شکل ۱۶: نمودار هیستریزس مدل اجرای محدود و نمونه آزمایشگاهی مدل ساده

شکل ۱۷ کانتور تنش فون مایسز به وجود آمده در مهاربند را نمایش می دهد که به دلیل سیکل های بارگذاری دچار تغییر شکل شده است. همانطور که از کانتور تنش مشخص است، بیشترین تنش در حلقه ایجاد شده است و تنش های ایجاد شده در عضو مهاربندی بسیار کمتر از تنش الاستیک فولاد مهاربند می باشد و در نتیجه نشان می دهد عضو مهاربندی به صورت الاستیک باقی می ماند.



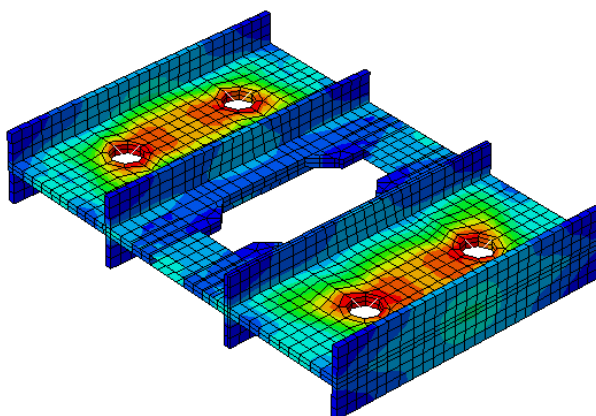
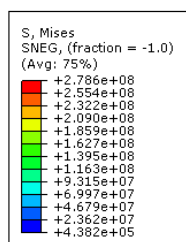
شکل ۱۷: کانتور تنش فون مایسز مدل ساده

در شکل ۱۸ نیز کانتور کرنش پلاستیک معادل را نشان می‌دهد. کرنش پلاستیک در نواحی وسط حلقه مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد که کانتور تسلیم نیز این موضوع را تایید می‌کند.



شکل ۱۸: کانتور کرنش پلاستیک معادل مدل ساده

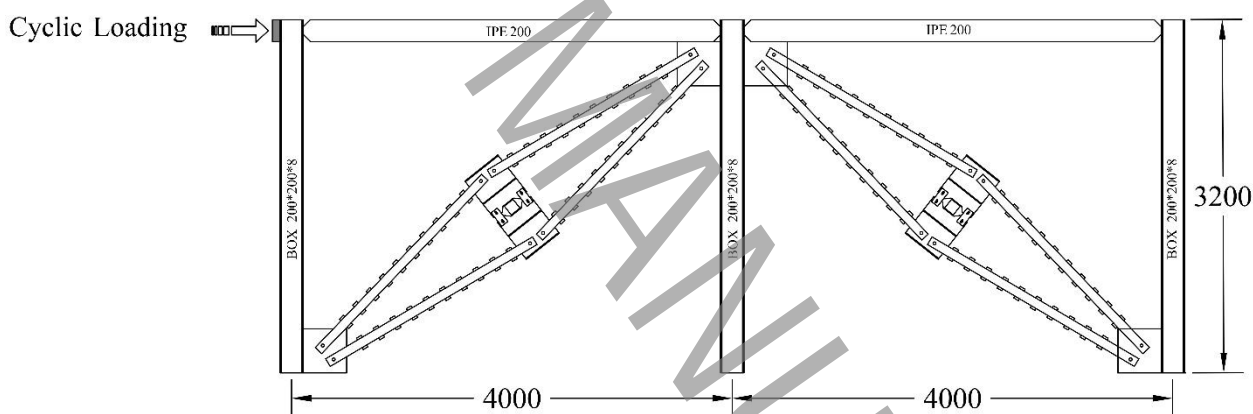
همچنین با توجه به اینکه در مدل نیمه سخت، بارهای زیادی توسط ورق های میانی (PL155*70*8) تحمل می شود، بنابراین به منظور کسب اطمینان از رفتار الاستیک این ورق در مهاربند پس از پایان آنالیز، کانتورهای تنش فون مایسز آن در شکل ۱۹ ارائه شده است.



شکل ۱۹: کانتورهای تنش فون مایسز مدل نیمه سخت

۸- مقایسه عملکرد سیستم پیشنهادی با سیستم مهاربند قطری

بنابراین پس از انجام آزمایشات و صحت‌سنجی آن‌ها، مدل ساده با مقیاس واقعی در یک قاب با دو دهانه ۴ متری و ارتفاع ۳/۲ متری قرار داده شده و با یک قابی که مهاربند قطری دارد، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. به منظور تبدیل به مقیاس واقعی کردن مدل لوزی شکل، معیار بر این اساس بوده است که زاویه لوزی تغییر نکند و سطح مقطع مهاربند لوزی و قطری با یکدیگر برابر باشند. نمای کلی قاب و مهاربند لوزی شکل استفاده شده در شکل ۲۰ ارائه شده است.

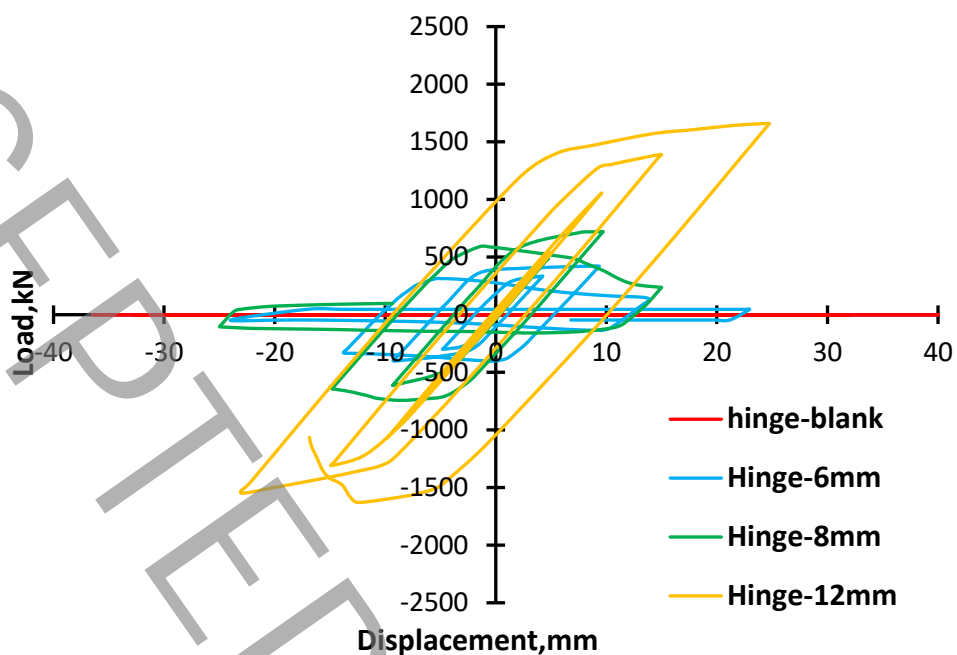


شکل ۲۰: نمای کلی قاب و مهاربند لوزی شکل

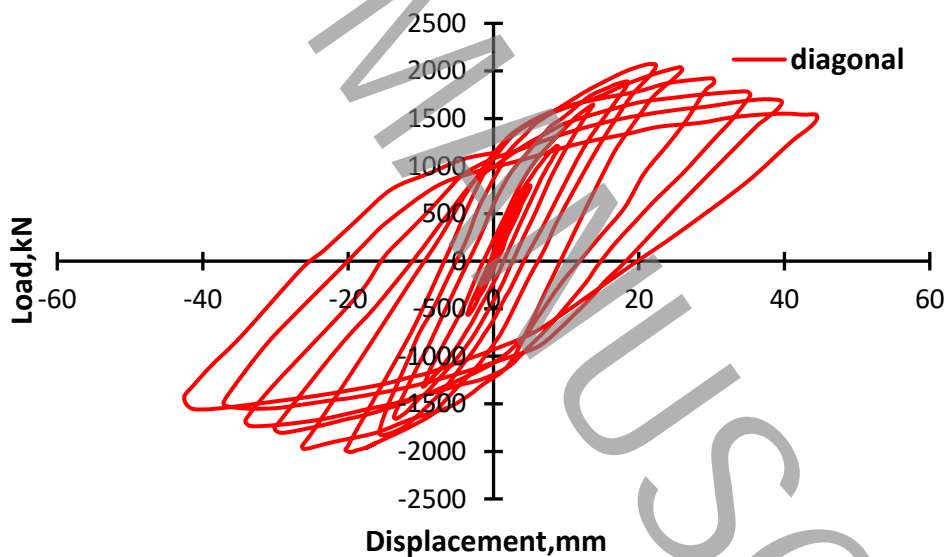
اعضای تیر و ستون در هر سه مدل با یکدیگر برابر بوده که در تمام اتصالات بصورت ساده رفتار می‌کنند. برای ستون‌ها از Box200*200*8 و برای تیرها از IPE200 استفاده شده است. مهاربندها با ورق گاست با ابعاد PL400*400*10 به ستون متصل شده است. برای اتصال مهاربندها با گاست از پین با قطر ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. 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 این نوع مهاربند طراحی شده است که پس از بارگذاری، اعضای تیرها و ستون‌ها همچنان در مرحله الاستیک باقی مانده و فقط مهاربند دچار کمناش شود. پس از حصول اعضای اصلی قاب، مدل ساده نیز با همان مقاطع (2UNP80) مدلسازی شدند.

اشکال ۲۱ و ۲۲ منحنی هیستریزس مدل لوزی شکل با حلقه‌هایی با ضخامت‌های مختلف و مدل مهاربند قطری را نشان می‌دهند. اطلاعات دقیق‌تر مقایسه‌ای، در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، ظرفیت حلقه‌ای با ضخامت ۱۲ میلی‌متر تقریباً ۲۵ درصد

کمتر از مهاربند قطری می باشد. بنابراین می توان به این نتیجه رسید که با تغییر در مشخصات هندسی و... حلقه، می توان ظرفیت های مختلفی را بدست آورد.



شکل ۲۱: منحنی هیستریزیس مدل های لوزی شکل



شکل ۲۲: منحنی هیستریزیس مدل قطری

جدول ۴: مقایسه عملکرد مدل های لوزی شکل و قطری

قطری	ساده - ۱۲ میلی متر	ساده - ۸ میلی متر	ساده - ۶ میلی متر	ساده - بدون حلقه	
۲۰۷۰/۸۰	۱۶۵۹/۶۲	۷۴۳/۳۶	۴۲۱/۳۴	-	ماکزیمم بار (kN)
۴۴/۳۴	۲۴/۷۶	۲۴/۹۸	۲۴/۰۱	-	ماکزیمم تغییر مکان (mm)
۵۹۹/۰۱	۸۸/۰۳	۳۰/۱	۲۴/۲	-	انرژی تلف شده (kJ)

۴۶/۹۳	۶۸/۸۷	۳۶/۶۱	۱۷/۵۶	-	سختی اولیه (kN/mm)
۱۰۲۶/۳۰	۱۰۵۶	۴۳۷/۹۰	۳۰۱/۶۰	-	تنش تسلیم (kN)
۱۹۶۴/۶	۱۶۵۹/۶	۷۱۹/۶۷	۴۲۱/۲۴	-	تنش نهایی (kN)

۸- نتیجه گیری

در این مقاله سیستم نوین مهاربندی لوزی شکل به همراه میراگر تسلیم شونده مورد ارزیابی و توسعه قرار گرفته است. بدین منظور با ساخت و بکارگیری سه نمونه نیمه سخت، سخت و ساده انجام آزمایش چرخه ای بر روی آنها، سیستم پیشنهادی مورد بحث و بررسی قرار گرفته و عملکرد و قابلیت آن در مقایسه با سایر سیستم های مهاربندی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. هدف از پیشنهاد این سیستم، ارائه سیستمی با قابلیت جذب انرژی بالا، تعمیرپذیری مناسب و بکارگیری مناسب و صحیح از ظرفیت میراگر مورد استفاده می باشد. نتایج این پژوهش آزمایشگاهی و عددی بطور خلاصه عبارت اند از:

۱- منحنی های نیرو-تغییر مکان هر سه مدل با توجه به انجام آزمایش چرخه ای بدست آمده است و در ادامه مقادیر جذب انرژی، بیشینه بار وارد شده، سختی مورد محاسبه قرار گرفته است. این نتایج بیانگر عملکرد کاملاً مناسب سیستم پیشنهادی و قابلیت اجرایی شدن آن در سازه می باشد.

۲- مدل ساده با توجه به مد خرابی که در آن میراگر جاری شده و سایر اعضای مهاربند در فاز الاستیک باقی مانده است، مناسب ترین عملکرد را در راستای اهداف این پژوهش داشته است و به عنوان مدل نهایی این سیستم پیشنهادی، معرفی شده است.

۳- در سیستم ساده پیشنهادی، حلقه فولادی و اعضای مهاربند برخلاف سایر سیستم های مورد بررسی در تحقیقات گذشته، بصورت غیرمستقیم عمل می کنند. بنابراین ضمن بکارگیری حداکثری از ظرفیت میراگر، در صورت گسیختگی میراگر، سیستم همچنان قابلیت اعمال نیرو را دارا می باشد و گسیختگی حلقه فولادی منجر به گسیختگی کل سیستم مهاربند نمی شود.

۴- با توجه به نحوه عملکرد مدل ساده، قابلیت تعمیرپذیری و جابجایی حلقه فولادی امکان پذیر می باشد.

۵- مدل المان محدودی سیستم پیشنهادی نیز در نرم افزار ABAQUS مورد شبیه سازی قرار گرفت و نتایج آن با مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه و صحت سنجی قرار گرفت.

۶- مقایسه عددی و آزمایشگاهی نتایج و نزدیکی آنها نسبت به هم نشان می دهد که سیستم پیشنهادی قابلیت مدلسازی در نرم افزارهای اجزاء محدود را دارا می باشد. بنابراین در تحقیقات آتی، نویسندگان به توسعه و گسترش مدل فوق و ارزیابی عملکرد آن در سازه های گوناگون تحت بارگذاری های مختلف و تحلیل های متفاوت خواهند پرداخت.

مراجع

- [1] M. Lotfollahi, M. Mofid, Innovative method in seismic design of slab-on-girder steel bridges, *Constructional Steel Research*, 64(12) (2008) 1420-1435.
- [2] H.L. Hsu, J.L. Juang, C.H. Chou, Experimental evaluation on the seismic performance of steel knee braced frame structures with energy dissipation mechanism, *Steel and Composite Structures*, 11(1) (1979) 77-91.
- [3] A.N.C.K. Murthy, 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] J.D. Marshall, F.A. Charney, A hybrid passive control device for steel structures, I: Development and analysis, *Constructional Steel Research*, 66(10) (2010a) 1278-1286.
- [5] J.D. Marshall, F.A. Charney, A hybrid passive control device for steel structures, II: Physical testing, *Constructional Steel Research*, 66(10) (2010b) 1287-1294.
- [6] H. Moghaddam, H. Estekanchi, On the characteristics of off-centre bracing system, *Constructional Steel Research*, 35(3) (1995) 361-376.
- [7] C. Amadio, I. Clemente, L. Macorini, M. Fragiaco, Seismic behaviour of hybrid systems made of PR composite frames coupled with dissipative bracings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(6) (2008) 861-879.
- [8] C.D. Annan, M.A. Youssef, M.H. El Naggar, Experimental evaluation of the seismic performance of modular steel-braced frames, *Engineering Structures*, 31(7) (2009) 1435-1446.
- [9] J.M. Kelly, R.I. Slinger, A.J. Heine, Mechanisms of Energy Absorption in Special Devices for Use in Earthquake Resistant Structures, *Bulletin of New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 5(3) (1972) 63-88.

- [10] R.I. Slinger, J.M. Kelly, A.J. Heine, Hysteresis Dampers for Earthquake Resistant Structures, *Earthquake Engineering and Structure Dynamic*, 3(3) (1974) 287-296.
- [11] W.K. Chan, F. Albermani, Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation, *Engineering Structures*, 30(4) (2008) 1058–1066.
- [12] M.A. Kafi, 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).
- [13] Z. Rakicevic, D. Jurukovshi, Behavior factor (q-factor) for non-standard dual steel frame structures, 11th European Conference on Earthquake Engineering, (1998).
- [14] A. Roufegarinejad, S. Sabouri, Nonlinear behavior of yielding damped bracing frames, 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York, (2002).
- [15] M. Motamedi, M. Hafezi, M. Yekrangnia, Analytical Study of Steel Ring Connections as Hysteretic Metallic Damper, 15 WCEE, (2012).
- [16] X.T. PENG, C. LIN, Y.M. CAO, W. X. DUAN, Seismic Behaviors of the Composite Central Brace with Steel Ring Damper, 7th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2018), 1089-1092.
- [17] M. Bazzaz, A. Kheyroddin, M.A. Kafi, Z. Andalib, Evaluation of the seismic performance of off-centre bracing system with ductile element in steel frames, *Steel and Composite Structures*, 12(5) (2012) 1-20.
- [18] Z. Andalib, M.A. Kafi, A. Kheyroddin, M. Bazzaz, Experimental investigation of the ductility and performance of steel rings constructed from plates, *Journal of Constructional Steel Research*, 103 (2014), 77–88.
- [19] M. Bazzaz, A. Kheyroddin, M.A. Kafi, Z. Andalib, H. Esmaeili, Evaluating the Seismic Performance of Off-centre Bracing System with Circular element in Optimum Place, *International Journal of Steel Structures*, 14(2) (2014) 1-12.
- [20] M. Bazzaz, Z. Andalib, M.A. Kafi, A. Kheyroddin, Evaluating the performance of OBS-C-O in steel frames under monotonic load, *Earthquakes and Structures*, 8(3) (2015) 697-710.
- [21] M. Bazzaz, Z. Andalib, A. Kheyroddin, M.A. Kafi, Numerical comparison of the seismic performance of steel rings in off-centre bracing system and diagonal bracing system, *Steel and Composite Structures*, 19(4) (2015) 917-937.
- [22] N. Gao, J.S. Jeon, D.E. Hodgson, R. DesRoches, An innovative seismic bracing system based on a superelastic shape memory alloy ring, *Smart Materials and Structures*, 25(5) (2016) 1-16.
- [23] Z. Andalib, M.A. Kafi, M. Bazzaz, S.B. Momenzadeh, Numerical evaluation of ductility and energy absorption of steel rings constructed from plates, *Engineering Structures*, 169 (2018) 94–106.
- [24] X. Peng, C. Lin, Y. Cao, W. Duan, Nonlinear Finite Element Simulation on Seismic Behaviour of Steel Frame-Central Brace with Ring Damper, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 472 (2019) 012031, doi:10.1088/1757-899X/472/1/012031.
- [25] A. Kheyroddin, R. Sepahrad, M. Saljoughian, M.A. Kafi, 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*, (2019) 4-11.
- [26] AISC, Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic application, Chicago, USA (2016).
- [27] Applied Technology Council, Guidelines for seismic testing of components of steel structures. Report of ATC-24, Redwood City, CA, USA (1992).