



پیشنهاد سیستم مهاربندی نوین با پره‌های دایروی خمشی جاری شونده تحت بار چرخه ای

سید بهرام بهشتی اول*، صبا قیومی

دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۴

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۲۱

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۲/۱۴

کلمات کلیدی:

سیستم مهاربند پره‌ای

مدل‌سازی عددی

بارگذاری چرخه‌ای

جذب انرژی

نیروی زلزله

خلاصه: استفاده از سیستم‌های مهاربندی معمول چون مهاربندهای هم مرکز در سازه‌های فولادی، پرکاربردترین روش برای مقابله با بارهای جانبی است. یکی از اشکالات این سیستم‌ها، کم‌انرژی بودن اثر بار فشاری است که موجب می‌گردد مهاربند قبل از رسیدن به حد تسلیم دچار ناپایداری شود. به عبارتی رفتار این مهاربندها در کشش و فشار نامتقارن بوده و علاوه بر کاهش توان سیستم در جذب انرژی تحریک سیستم، ساختمان‌های دارای این مهاربندها تحت ضربه حاصل از تغییر جهت نیروهای اینرسی قرار گرفته و لذا صدمات زیادی به اجزای سازه ای و غیرسازه ای آن‌ها وارد می‌گردد. جهت حل این مشکل در راستای بهبود عملکرد مهاربندها، در این مقاله سیستم مهاربندی نوینی با عنوان مهاربند پره‌ای برای اولین بار معرفی شده است. مهاربند پره‌ای با کمک حذف اثرات مضر کم‌انرژی فشاری، خاصیت شکل‌پذیری و جذب انرژی سیستم را از طریق جایگزینی تغییرشکل‌های محوری توسط تغییرشکل‌های خمشی، بهبود می‌بخشد. این جایگزینی سبب نرم‌تر شدن سیستم و به تبع آن افزایش پیروی ارتعاش طبیعی سیستم و لذا کاهش برش پایه زلزله می‌گردد. در این تحقیق با مدل‌سازی عددی و اعمال بارگذاری چرخه‌ای براساس پروتکل بارگذاری ATC-24، مهاربند پیشنهادی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. رفتار متقارن حتی تحت جابه‌جایی‌های چرخه‌ای بزرگ و همچنین جذب انرژی بالا و وزن کمتر در مقایسه با مهاربندهای رقیب آن چون مهاربند کم‌انرژی تاب از مزایای این سیستم می‌باشد.

۱- مقدمه

که موجب کاهش شکل‌پذیری و جذب انرژی سازه و همچنین آسیب به اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای می‌گردد. مطالعات انجام گرفته به منظور بهبود عملکرد در رفتار لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی و کمک به جذب انرژی و شکل‌پذیری آن‌ها موجب شد تا راه‌حل‌های جدیدی همانند استفاده از عضو تسلیم شونده در مهاربندها ارائه شود. استفاده از فلز تسلیم شونده به عنوان فیوز سازه‌ای از جمله روش‌های مؤثر و مقرون به صرفه بوده که نیازمند تکنولوژی ساخت خاصی نیز نمی‌باشد. ایده استفاده از عضو فولادی تسلیم شونده مربوط به بیش از ۴۰ سال پیش است [۱]. به مرور با انجام تحقیقات عددی و آزمایشگاهی و همچنین بازخورد تجارب آسیب‌های وارده در اثر زلزله

زلزله یکی از مخاطرات طبیعی است که طی نیم قرن اخیر خسارت‌های جانی و مالی بسیاری به بار آورده و با توجه به زلزله‌خیز بودن بسیاری از مناطق پرجمعیت شهری، ضروری است که بیش از این به روش‌های مقابله با این پدیده از طریق طراحی سازه‌های مقاوم جدید و مقاوم سازی سازه‌های موجود بپردازیم.

استفاده از سیستم‌های مهاربندی متداول به منظور مقابله با بارهای جانبی از گذشته تا به امروز کاربرد بسیاری داشته است. از اشکالات مهاربندهای معمولی و ویژه کم‌انرژی آن‌ها تحت نیروهای فشاری است

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: beheshti@kntu.ac.ir



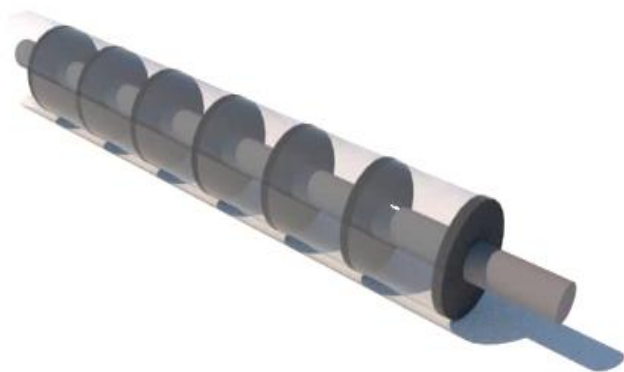
میراگر PFD یکی از جدیدترین کارها پیرامون سیستم‌های جاذب انرژی است. این میراگر به کمک لوله‌های فلزی قابل تعویض، انرژی ورودی زلزله را مستهلک می‌کند. ویژگی بارز این میراگر امکان نصب آن در قسمت‌های مختلف مانند وسط مهاربندهای قطری و شورون است [۱۰].

مهاربندهای مقاوم در برابر کمناش (BRB) یکی از پرکاربردترین سیستم‌های جاذب انرژی می‌باشد. ایده این مهاربندها اولین بار در سال ۱۹۷۱ توسط یاشینو مطرح شد و طی سالهای بعد گسترش یافت [۱۱]. استفاده از این مهاربندها بعد از زلزله نورث‌ریج در سال ۱۹۹۴ و کوبه در سال ۱۹۹۵ در آمریکا و ژاپن بطور گسترده آغاز شد. این تحقیقات بعد از زلزله نورث‌ریج ادامه یافت و توسط کلارک^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۹، لویز^۲ در سال ۲۰۰۱، آیکن^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۲، کومار^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۷، شمشادیان و همکاران در سال ۲۰۱۱ و جلائی فر و همکاران در سال ۲۰۱۲ ارتقا یافت [۱۲-۱۷]. از معایب این مهاربندها می‌توان به سنگینی جداره بتنی، مشکلات عمل آوری و نگهداری از بتن، صعوبت نصب و همچنین کنترل مشخصات لرزه‌ای چون سختی و مقاومت و شکل پذیری تنها توسط مشخصات هسته فلزی (سطح مقطع و مشخصات مکانیکی) اشاره کرد. از نقطه نظر طراحی لرزه‌ای در این مهاربندها امکان تغییر سه مشخصه دینامیکی یادشده بطور مستقل از هم میسر نمی‌باشد.

هدف این پژوهش معرفی یک مهاربند نوین با عنوان مهاربند پره‌ای است. مکانیزم این مهاربند شبیه جاذب‌های انرژی تسلیمی DBS، CSY و PFD اشاره شده در بالا می‌باشد. تفاوت اساسی مهاربند ارائه شده در قرارگیری دیسک‌های تسلیم شونده در داخل غلاف فلزی در یک مهاربند به جای جاذب با طول محدود است. ارائه تکنیک ساخت و خصوصیات چرخه‌ای این مهاربند چون سختی و ضریب استهلاک از دیگر نوآوری‌های این مطالعه می‌باشد. در ادامه این مطالعه از آنجا که این مهاربند به سبب خصوصیات چرخه‌ای جاذب انرژی و رفتار یکسان تحت نیروی کششی و فشاری، مشابه مهاربند شناخته شده کمناش تاب است، مقایسه‌ای نیز به لحاظ عملکرد سازه‌ای میان این دو مهاربند مهاربند شناخته شده انجام یافته است. در این

به ساختمان‌هایی که مجهز به این گونه سیستم‌های مقاوم بودند، این ایده‌ها رشد و تعالی یافتند [۲-۴]. میراگرهای ADAS و TADAS نمونه‌ای از سیستم‌های جاذب انرژی ابداعی است. این میراگرها به همراه مهاربندهای شورون داخل قاب‌های فولادی یا بتنی در محل تلاقی مهاربند و تیر طبقه قرار می‌گیرند. ورق‌های تشکیل دهنده این میراگرها در اثر تغییر مکان نسبی طبقات تحت تغییر شکل خمشی قرار گرفته و در اثر تسلیم آن‌ها انرژی زیادی مستهلک می‌گردد [۵]. ایده استفاده از میراگرهای اصطکاکی-تسلیم فولاد در مرکز سیستم‌های مهاربندی مقاطع نمونه‌ی دیگری از این سیستم‌های نوین است. این سیستم، ترکیبی از میراگرهای حلقوی و اصطکاکی است. میراگر حلقوی در مرکز یک قاب ساده مهاربندی شده قرار گرفته و توسط اتصال اصطکاکی به مهاربند متصل می‌شود. به علت کاربرد همزمان اصطکاک و تسلیم فلز، ضعف میراگرهای فلزی تسلیم شونده در زلزله‌های ضعیف تا متوسط به کمک این سیستم بهبود می‌یابد [۶]. فیوز فولادی جاری شونده CSY از تازه‌ترین ابداعات صورت گرفته از نوع سیستم‌های جاذب انرژی است. این فیوز فولادی در انتهای مهاربند در قاب‌های مهاربندی همگرا قرار می‌گیرد و به گونه‌ای طراحی شده تا از طریق خمش یک سری ورق فولادی تحت بار لرزه‌ای پاسخ هیستریزس پایداری را فراهم کند [۷]. ایده استفاده از خمش صفحات فولادی به منظور جذب انرژی در مهاربند کشویی (DBS) نیز استفاده شده است. این سیستم مهاربندی به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده‌ی X شکل ارائه شده است. مهاربندهای کشویی از سه صفحه موازی تشکیل شده‌اند که توسط صفحات انتقال به هم متصل می‌شوند. صفحات موازی با تبدیل نیروی محوری به لنگر خمشی در صفحات انتقال مانع کمناش محلی مهاربند شده و خاصیت جذب انرژی و شکل‌پذیری مهاربندهای X شکل را به کمک حذف پدیده‌ی کمناش بهبود می‌بخشند [۸]. از دیگر سیستم‌های جاذب انرژی نوین می‌توان به استفاده از نوارهای فولادی U شکل به منظور اتلاف انرژی در مهاربندها اشاره کرد. در این میراگر انرژی ورودی زلزله به کمک خمش نوارهای فولادی U شکل مستهلک می‌شود. ظرفیت تغییر شکل میراگر عمدتاً مربوط به طول قسمت‌های مستقیم عناصر U شکل است و با تغییر طول قسمت‌های مختلف کنترل می‌شود. نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی نمونه‌ها قابلیت جذب انرژی بالای سیستم را تأیید می‌کند [۹].

1 Clark
2 Lopez
3 Aiken
4 Kumar



شکل ۱. نمایش اجزای داخلی و شمای کلی مهاربند پره‌ای

Fig. 1. The schematic view and internal components of the FBS

فراهم می‌شود. از آنجا که پتانسیل شکل‌پذیری حاصل از خمش در تسلیم بسیار بیشتر از شکل‌پذیری حاصل از تسلیم محوری است، لذا تغییرشکل‌های پلاستیک دیسک‌ها استهلاک قابل ملاحظه‌ای را همراه با شکل‌پذیری بالا برای این سیستم فراهم می‌آورند (برخلاف مهاربندهای کمانش‌تاب که به علت سختی بالای مقطع تحت بار محوری شکل‌پذیری کمتری در تسلیم ارائه می‌دهد). اگرچه امکان تسلیم در شفت نیز در این مهاربند چون مهاربند کمانش‌تاب فراهم می‌باشد، اما با انتخاب مناسب سطح مقطع دیسک‌ها و تعداد آنها، هدف تمرکز تغییرشکل‌های تسلیم در دیسک‌ها به عنوان فیوز سازه‌ای است. با انتخاب مناسب فاصله دیسک‌ها و سطح مقطع شفت، از کمانش شفت در فاصله بین دیسک‌ها جلوگیری به عمل می‌آید. همچنین شکل و ابعاد دیسک‌های فولادی نقش مهمی در میزان انرژی مستهلک شده و نرمی مهاربند دارند. ابعاد غلاف فولادی نیز به

مقاله تأثیر پارامترهای مختلف بر روی رفتار چرخه ای این مهاربند با روش عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است. ساخت و انجام تست های آزمایشگاهی بر اساس این مطالعات عددی در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در حال انجام می‌باشد، که به محض اتمام گزارش مربوطه ارائه خواهد شد.

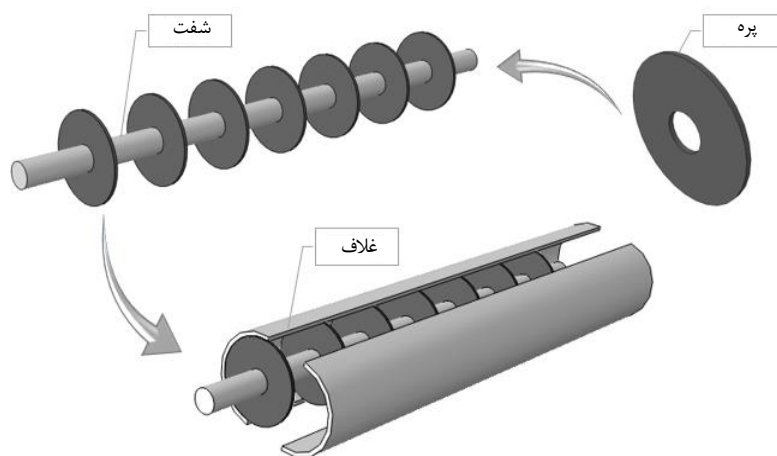
۲- معرفی مهاربند پره‌ای

شمای شماتیک و اجزای داخلی مهاربند پره‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است.

این مهاربند از سه بخش دیسک‌های فولادی، شفت مرکزی و غلاف فولادی تشکیل شده است. شفت فولادی از میان دیسک‌های موازی که توسط جوش و یا اتصالات خاص پیچی به آن متصل شده عبور داده می‌شود. بر روی جداره‌ی داخلی غلاف شیارهایی به ضخامت دیسک‌ها (با یک رواداری مناسب) ایجاد می‌شود به گونه‌ای که پس از قرارگیری مجموعه دیسک‌ها و شفت در داخل غلاف فولادی محیط خارجی دیسک‌ها در داخل این شیارها قرار می‌گیرد. شکل ۲ نحوه‌ی قرارگیری اجزای مختلف مهاربند را نشان می‌دهد.

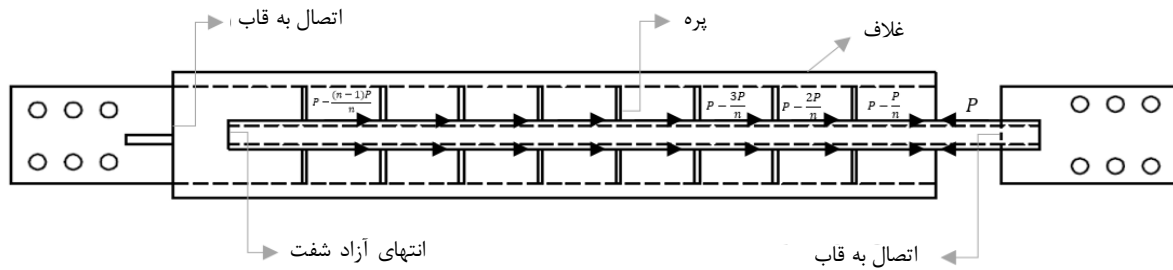
۳- مکانیزم عملکردی مهاربند

در این مهاربند، نیروی محوری در محل اتصال آن به قاب توسط شفت به دیسک‌های متصل شده منتقل می‌شود. این نیروی محوری در دیسک‌ها تبدیل به خمش گردیده و سختی، مقاومت و استهلاک انرژی در این مهاربندها توسط این دیسک‌ها (پره‌ها)



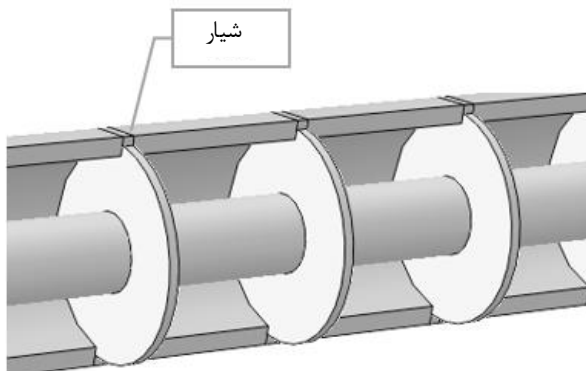
شکل ۲. اجزای مهاربند پره‌ای و نحوه‌ی قرارگیری آن‌ها

Fig. 2. The arrangement of components of the FBS



شکل ۳. نحوه قرارگیری شفت در مهاربند پره‌ای
 Fig. 3. The placement of the shaft in the FBS

بار محوری تا فاصله فوق کاهش می‌یابد (شکل ۳).
 غلاف: از آنجا که تسلیم و کمانش‌های موضعی در غلاف سبب مختل شدن تسلیم یکنواخت دیسک‌ها می‌گردد، غلاف هم مانند شفت باید به نحوی عمل کند که در طول بارگذاری الاستیک باقی بماند. در محل نشیمن‌گاه پره‌ها تنش‌های لهدیگی بالایی بر غلاف وارد می‌شود که می‌توان با انتخاب ضخامت مناسب، اضافه نمودن سخت کننده و یا در صورت نیاز کاربرد فولاد پرمقاومت در ساخت آن، این مسأله را کنترل کرد. به منظور اتصال پره‌ها به غلاف، باید غلاف را به صورت دو نیم دایره مجزا همراه با شیارهایی در سطح داخلی جهت تکیه‌گاه خارجی دیسک‌ها ساخت. سپس پره‌ها از یک طرف در داخل شیارها قرار گرفته و نیمه‌ی دیگر غلاف از سمت مخالف به این نیمه جوش می‌شود. لبه غلاف‌ها باید به گونه‌ای آماده گردد که امکان جوش شیار در فاصله بین دو لبه فراهم شود. غلاف از یک سمت به قاب متصل است. شکل ۴ شیارهای تعبیه شده در سطح داخلی غلاف را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نحوه قرارگیری پره‌ها در شیار
 Fig. 4. The placement of the fans in the groove

گونه‌ای انتخاب خواهد شد که تسلیم خمشی دیسک‌ها قبل از کمانش کلی مهاربند اتفاق افتد و تسلیم و کمانش‌های موضعی نیز پیش از آن حادث نگردد.

عملکرد هریک از اجزای مهاربند ذیلاً تشریح می‌گردد:
 پره‌ها: مهم‌ترین نقش در مهاربند پره‌ای به عهده دیسک‌های فولادی است. این پره‌های فولادی با ابعاد یکسان بطور متقارن در طول شفت قرار می‌گیرند. پره‌ها نیروهای منتقل شده از طرف شفت را با تغییرشکل‌های خمشی تحمل می‌کنند. استفاده از ورق‌های با ضخامت مناسب برای ساخت پره‌ها موجب شکل‌پذیری بیشتر و ممانعت از وقوع یک مود شکست ترد و غیر دلخواه می‌شود. در نتیجه سیستم می‌تواند تغییرمکان‌های جانبی بزرگتری را تحمل کند. از طرفی پره‌ها با هدف وارد شدن به ناحیه‌ی پلاستیک طراحی می‌شوند. بنابراین برای رسیدن به هدف یاد شده می‌توان از تعداد و ضخامت مناسب یا تغییر مشخصات مکانیکی فولاد (استفاده از فولاد نرم با سطح تسلیم کمتر) در ساخت آن‌ها استفاده کرد (شکل ۳).

شفت: نقش انتقال نیروی محوری از طرف قاب به پره‌ها را دارد. اگرچه تسلیم محوری شفت مجاز محسوب می‌شود و میتوان بخشی از انرژی ورودی را در آن جذب نمود اما به جهت اعمال سهم نسبتاً مساوی از تسلیم در کل دیسک‌ها مطلوب‌تر آن است که به نحوی عمل کند که در ناحیه الاستیک باقی بماند. به عبارت دیگر با رفتار صلب‌گونه سهم نسبتاً یکسانی از تغییرشکل‌ها به دیسک‌ها منتقل شود. بنابراین لازم است سطح مقطع، ضخامت و نوع فولاد به کار رفته در ساخت آن به نحوی باشد که هدف فوق را اقناع کند. شفت از یک سمت به قاب متصل و سر دیگر آن در داخل غلاف و آزاد است تا امکان حرکت در راستای محوری را داشته باشد. نیروی محوری در فاصله هر پره از سر شفت تا انتها به اندازه معادل جمع سهم هر پره از

۴- مدل سازی مهاربند

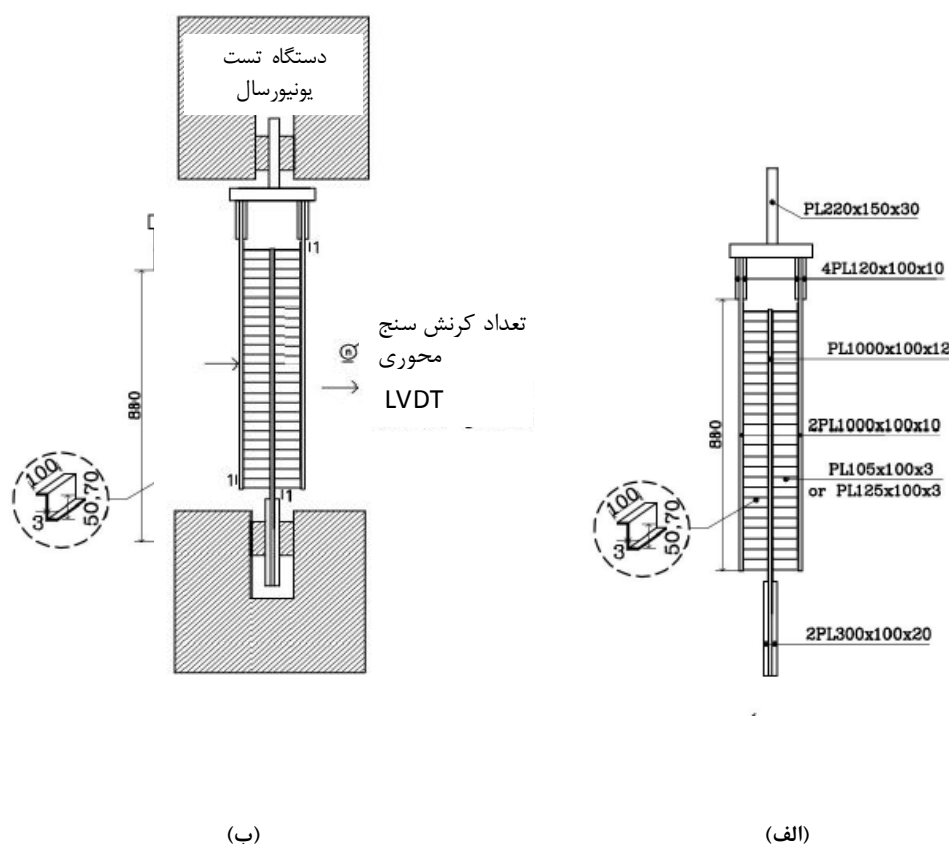
۴-۱- صحت سنجی:

مدل سازی مهاربند در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS [۱۸] انجام شده است. به منظور بررسی اعتبار مدل سازی در نرم افزار آباکوس، مهاربند DBS، که در سال ۲۰۱۶ توسط پاینده جو و همکاران ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است [۱۹] در نرم افزار آباکوس مدل سازی و نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

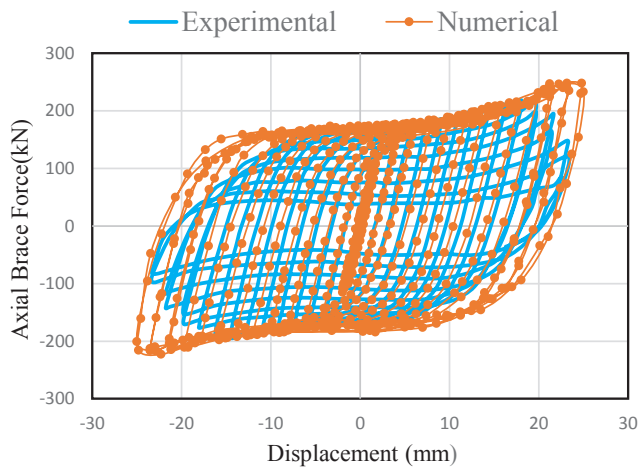
در این پایان نامه ۳ نمونه مهاربند با مشخصات متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته که نمونه دوم با مشخصات موجود در شکل ۵-الف، به منظور صحت سنجی انتخاب شده است. در نمونه مورد آزمایش ۵۲ عدد ورق جاذب انرژی Z شکل به ارتفاع ۷۰ میلی متری و با فاصله ۲۷ میلی متری از هم قرار داده شده است. این نمونه به کمک دستگاه یونیورسال مورد آزمایش قرار گرفته و مطابق شکل ۵-ب، ۳ عدد کرنش سنج محوری در نزدیکی تکیه گاه ها برای خواندن کرنش محوری و یک عدد تغییر مکان سنج (LDVT) برای بررسی وضعیت

کمانش داخل صفحه در وسط نمونه تعبیه شده است. همچنین برای ورق های جاذب انرژی و ورق های موازی به ترتیب از فولاد با تنش تسلیم ۲۰۰ و ۲۶۰ MPa و مدول الاستیسیته 200 kN/mm^2 استفاده شده است.

برای مدل سازی ورق های جاذب انرژی در نرم افزار آباکوس از المان S⁴R (المان چهارگره ای پوسته با انتگرال گیری کاهش یافته) و از اندازه مش ۵ و برای مدل سازی سایر اعضا از المان C³D⁸R (المان سه بعدی سالیید، ۸ گره ای با انتگرال گیری کاهش یافته) و اندازه مش ۱۰ استفاده شده است. مصالح با سخت شوندگی کینماتیک دوخطی (Bilinear kinematic hardening materials) به المانها اختصاص داده شد. بارگذاری براساس پروتکل بارگذاری ATC-۲۴ [۲۰] به صورت تغییر مکان کنترل به نمونه اعمال شده است (شکل ۶ را ببینید). براساس توضیحات پایان نامه تغییر مکان اولین تسلیم برای استفاده در پروتکل بارگذاری ATC-۲۴ برای نمونه آزمایش شده برابر ۱/۸ میلی متر محاسبه شده است. برای اتصال ورق های جاذب انرژی به ورق های موازی در نرم افزار آباکوس از قید Tie استفاده شده



شکل ۵. الف) ابعاد و اندازه های نمونه مورد آزمایش ب) موقعیت قرارگیری کرنش سنج ها و تغییر مکان سنج ها [۱۹]
 Fig. 5. (a) Location of strain gauges and LVDTs, (b) Dimensions and sizes of the test specimen [19]



شکل ۸. منحنی هیستریزیس مهاربند DBS مدل‌سازی شده در مقایسه با منحنی هیستریزیس مدل آزمایشگاهی

Fig. 8. Comparison of numerical and experimental hysteresis curves of the DBS

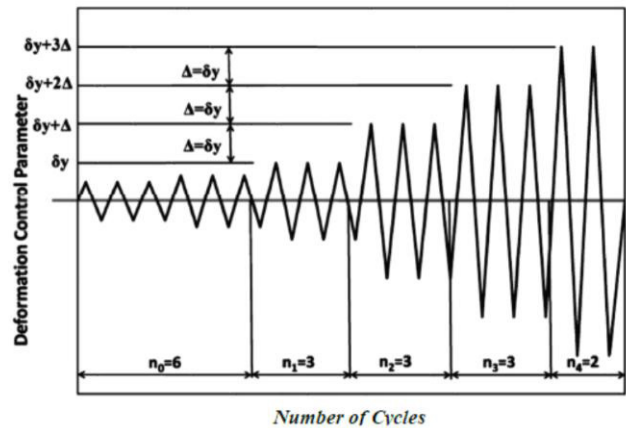
جایگزین شود.

مدل جایگزین موردنظر در بردارنده مدل بخش‌های سه گانه مهاربند با المان پوسته و استفاده از ابزار متصل‌کننده نرم‌افزار برای اتصال پره‌ها به غلاف است. به کمک ابزارهای اتصال‌دهنده می‌توان اتصال بین دو نقطه در یک مجموعه و یا یک نقطه با زمین را برقرار کرد. ابزارهای اتصال‌دهنده هنگامی استفاده می‌شوند که به صورت خاص نمی‌خواهیم اتصال را مورد بررسی قرار دهیم و صرفاً اثر اتصال در سختی و پاسخ کلی سیستم مورد نیاز است.

MPC، Assembled/Complex و Basic سه دسته

اتصال‌دهنده موجود در آباکوس هستند.

- Basic: اتصال‌دهنده Basic شامل دو نوع انتقالی و دورانی است. که نوع انتقالی، بر درجات آزادی انتقالی هر دو نقطه و نیز درجات آزادی دورانی نقطه اول و نوع دورانی تنها بر درجات آزادی دورانی دو نقطه تأثیرگذار است.



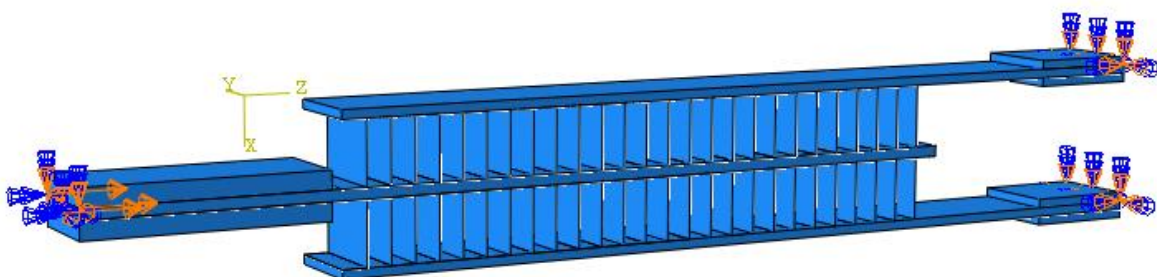
شکل ۶. پروتکل بارگذاری اعمالی به مهاربند DBS [19]
Fig. 6. Applied loading protocol to the DBS [19]

است. شرایط تکیه گاهی و نحوه اعمال بار در شکل ۷ نشان داده شده است. مشخصات مصالح تعریف شده برای المان‌ها مشابه با شرایط آزمایش است.

شکل ۸، منحنی هیستریزیس حاصل از روش عددی با نمونه آزمایش شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود این دو نمودار مطابقت مناسبی با یکدیگر دارند و خطای مدل‌سازی کمتر از ۵ درصد است.

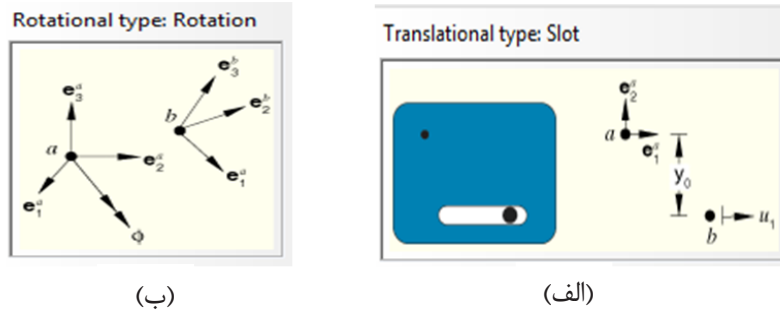
۴-۲- مدل‌سازی:

مسئله اصلی در مدل‌سازی مهاربند پره‌ای، مدل‌سازی شیار تعبیه شده در غلاف فولادی است. برای منظور نمودن شیار بایستی، غلاف و پره‌ها با المان‌های سه بعدی سالیید مدل شوند. از آنجا که لازم است تحلیل‌های زیادی به جهت بررسی و تعیین مشخصات لرزه‌ای مهاربند انجام شود و همچنین جهت مدل‌کمانش‌های موضعی اجزاء مهاربند، کاربرد المان‌های سه بعدی سالیید از نظر اقتصادی و صرف زمان به صرفه نیستند، از این رو سعی گردیده مدل تحلیلی ساده‌تری



شکل ۷. مدل اجزا محدود و شرایط تکیه‌گاهی نمونه مدل‌سازی شده

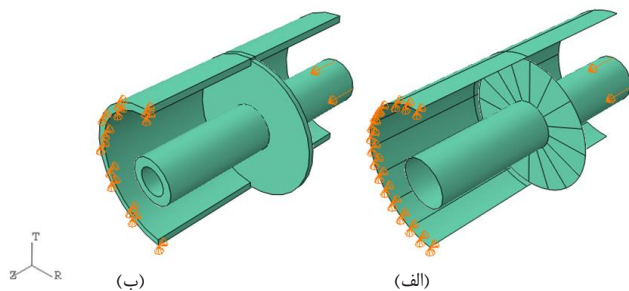
Fig. 7. The finite element model and the support conditions of the modeled brace



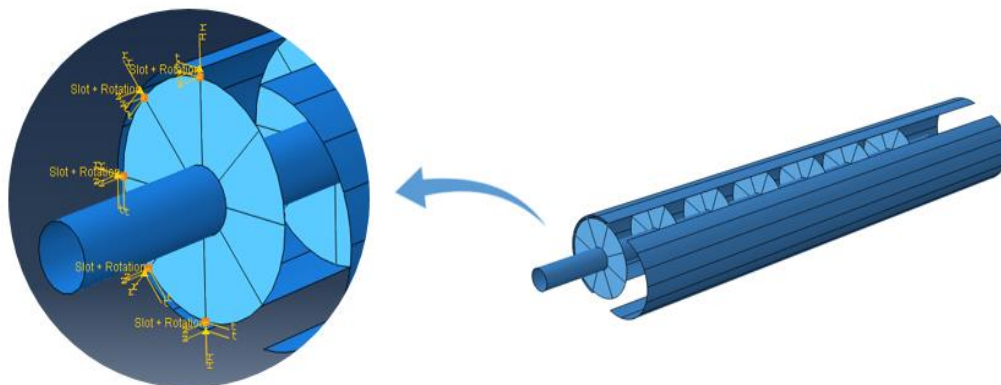
شکل ۹. تصویر شماتیک از اتصال دهنده Basic مورد استفاده: (الف) نوع انتقالی و (ب) نوع دورانی [۱۸]
Fig. 9. The schematic view of the used basic connector, (a) translation type (b) rotational type

شکل ۱۰ نحوه‌ی اتصال پره‌ها به غلاف در مدل جایگزین را نشان می‌دهد.

جهت اطمینان از درستی فرض در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی، بخشی از مهاربند که شامل یک پره می‌باشد در دو حالت مطابق شکل ۱۱، با مشخصات موجود در جدول ۱، مدل‌سازی شده است. ابعاد در جدول ۱ انتخابی و براساس تعداد زیاد تحلیل‌های انجام یافته بوده و



شکل ۱۱. مهاربند پره‌ای در دو حالت (الف) پوسته و (ب) سالیید
Fig. 11. The FBS, (a) with shell and (b) with solid elements



شکل ۱۰. نحوه‌ی اتصال پره‌ها به غلاف در مدل جایگزین
Fig. 10. The connection of the fans to the casing in the alternative model

• Assembled/Complex اتصال دهنده Assembled/Complex: ترکیبی از اتصالات از پیش تعیین شده از نوع Basic است. Complex ترکیبی از درجات آزادی در اتصال را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

• MPC اتصال دهنده MPC را می‌توان برای تعریف قیدهای چند نقطه‌ای بین دو نقطه انتخاب شده، بکاربرد [۱۸].

از آنجا که شرایط مرزی پره در شیار به صورت تماسی است نوع اتصال دهنده مورد استفاده جهت اتصال پره به غلاف در مدل جایگزین از نوع Basic انتخاب شده است که به کمک این اتصال دهنده بتوان درجات آزادی دورانی و درجه آزادی انتقالی در جهت شعاع پره‌ها را بین محیط خارجی پره و سطح داخلی غلاف به درستی تعریف کرد. رابط slot به عنوان رابط انتقالی انتخاب شده است. خط حرکت رابط slot در جهت e_1^a است. این رابط بصورت شماتیک در شکل ۹-الف نشان داده شده است. رابط rotation هم به عنوان رابط دورانی انتخاب شده است که بصورت شماتیک در شکل ۹-ب نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات مدل مهاربند پره‌ای در دو حالت پوسته و سالیید

Table 1. Specifications of the FBS modeled with shell and solid elements

ابعاد [mm]	نوع المان		پره
	سالیید	پوسته	
شعاع داخلی ۵۰	C3D8R ^۲	S4R ^۱	
شعاع ^۳ خارجی			
سالیید ۱۵۰ / پوسته ۱۴۰			
ضخامت ۸	C3D8R	S4R	شفت
تعداد ۱			
طول ۵۰۰			
شعاع داخلی ۳۷	C3D8R	S4R	غلاف
شعاع خارجی ۵۰			
طول ۵۰۰			
شعاع خارجی ۱۵۵	C3D8R	S4R	
ضخامت ۱۵			

۱. S4R، المان ۴ گره‌ای از گروه پوسته‌ها، مناسب و رایج در استفاده‌های معمول تحلیل پوسته، دارای فرمول‌بندی کاهش یافته.

۲. C3D8R، المان ۸ گره‌ای مکعبی یا آجری شکل، سه بعدی، دارای فرمول‌بندی کاهش یافته.

۳. در مدل واقعی مهاربند عملاً طولی از پره‌ها در جهت شعاعی که در داخل شیار قرار می‌گیرد، از شعاع پره کم می‌شود، به علت ناچیز بودن این طول در مقایسه با شعاع پره، در مدل جایگزین، شعاع پره با صرف‌نظر کردن از طول تکیه‌گاهی بیان شده تعیین می‌شود. در این حالت ابعاد غلاف بدون تغییر باقی می‌ماند و اتصال‌دهنده‌ها در فاصله ایجاد شده بین پره‌ها و سطح داخلی غلاف قرار می‌گیرند. این مقدار به منظور جلوگیری از خارج شدن پره از شیار در هنگام ساخت، حداقل برابر ضخامت پره در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۲ در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی مهاربند در حالت سالیید بین طرفین پره‌ها با لبه‌های داخلی شیار، تماس سطح به سطح تعریف شده است. در هر دو حالت پوسته و سالیید برای اتصال طرفین غلاف و همچنین اتصال پره‌ها به شفت از قید Tie استفاده شده است. درجات آزادی انتقالی انتهایی پره در جهت Z و T به غلاف بسته شده و بارگذاری بصورت تغییرمکان-کنترل در انتهایی شفت وارد شده است.

بارگذاری چرخه‌ای مطابق پروتکل بارگذاری ATC-۲۴ [۲۰]، بر هر دو مدل اعمال شده است. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب بارگذاری اعمالی و منحنی هیستریزیس به دست آمده را نشان می‌دهند.

جدول ۲. مشخصات مصالح در مدل‌سازی مهاربند پره‌ای

Table 2. Specifications of materials used in modeling

FBS		
شفت و غلاف	پره‌ها	
۲۱۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰	مدول الاستیسیته [MPa]
۰/۳	۰/۳	نسبت پواسون
۳۷۰	۲۴۰	تنش تسلیم [MPa]
۵۲۰	۳۷۰	تنش نهایی [MPa]
۰/۲	۰/۲۴	کرنش نهایی

هدف از این ابعاد فقط مقایسه نتایج دو المان سالیید و پوسته با یکدیگر می‌باشد. مهاربند تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفته است.

برای تعریف مشخصات پلاستیک فولاد از سخت‌شوندگی ایزوتروپیک در نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌شود. در ضمن برای درک درست از رفتار سازه می‌بایست تمام خصوصیات رفتاری ماده تعریف شود تا مدلی دقیق‌تر را بتوان ارائه نمود. برای بیان خصوصیات پلاستیک فولاد به نرم‌افزار ابتدا می‌بایست کرنش‌ها و تنش‌های پلاستیک واقعی را برای این نوع ماده محاسبه گردد به همین منظور با استفاده از معیار راسموسن پارامترهای مورد نیاز بدست می‌آیند [۲۳-۲۱]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{true} &= \ln(1 + \varepsilon_{nominal}), \\ \varepsilon_{nominal} &= \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \\ \sigma_{true} &= \sigma(1 + \varepsilon_{nominal}), \\ \varepsilon_{plastic} &= \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E}, \end{aligned} \quad (1)$$

که در آنها $\sigma, \sigma_{0.2}, n$ به ترتیب پارامتر توان راسموسن، تنش ۰/۲ فولاد و تنش وارد بر جسم می‌باشند. براین اساس مشخصات فولاد مطابق با

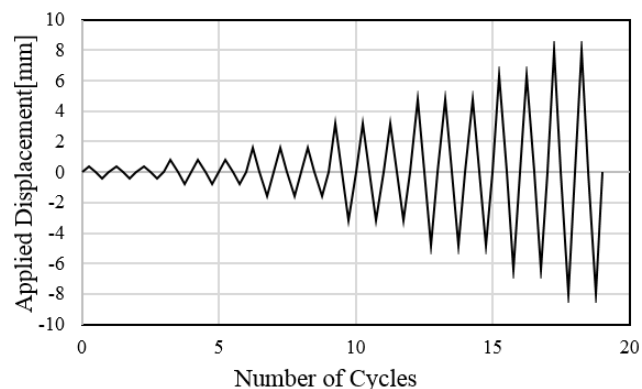
ساختمان فلزی کوتاه مرتبه

سازه مورد بررسی، ساختمان ۴ طبقه و ۳ دهانه که طول هر دهانه ۵ متر و ارتفاع هر طبقه ۳/۲ متر با پلان مربع می‌باشد که در منطقه با خطر لرزه‌خیزی زیاد واقع شده است. سیستم باربر جانبی در هر دو جهت سیستم مهاربندی انتخاب شده است (شکل ۱۴). جهت طراحی سازه از آیین نامه ASCE/SEI ۷-۱۶ [۲۵] استفاده شده است. برای تعیین ضریب زلزله، با فرض مسکونی بودن، ضریب اهمیت ساختمان ۱ و خاک نوع B برای طراحی به روش استاتیکی معادل انتخاب شده است. برآورد ضریب رفتار مهاربند پره‌ای در حال حاضر تحت تحقیق بوده و از آنجا که در زمان نگارش این مقاله هنوز نتایج آن قطعی نشده است، لذا ضریب رفتار ۷ که مابین مهاربند کمانش‌تاب و مهاربند همگرای ویژه فولادی است، به عنوان ضریب رفتار مهاربند پره‌ای در نظر گرفته شده است.

در مهاربندهای شورون متداول به علت کمانش عضو فشاری یک نیروی برشی نامتوازن در تیر ایجاد می‌شود. در مهاربند پره‌ای با توجه به عدم کمانش مهاربند تحت نیروهای فشاری در طراحی تیرهای دهانه مهاربندی این برش نامتوازن حذف می‌گردد. با توجه به مطالب ذکر شده طراحی سازه صورت گرفته و مقدار نیروی محوری ایجاد شده در مهاربند طبقه اول قاب مورد بررسی برابر با ۶۰۰ کیلونیوتن به دست آمده است. براساس اولویت، تسلیم پره‌ها و در نهایت تسلیم محدود شفت مرکزی مودهای خرابی نرم و مطلوب سیستم مهاربند پره‌ای بوده که عدم تسلیم غلاف و خرابی اتصالات با انتخاب مناسب پارامترهایی چون جنس، تعداد و ابعاد پره‌ها و ضخامت و جنس غلاف و شفت مرکزی قابل حصول است. روابط مربوطه در مرجع [۲۶] قابل برداشت می‌باشد که به کمک آن‌ها ابعاد مناسب بر اساس مفهوم زنجیر پاولی برای مهاربند انتخاب شده است. مشخصات مصالح و ابعاد مهاربند مدل‌سازی شده برای ساختمان مورد نظر به ترتیب مطابق جدول ۲ و ۳ است.

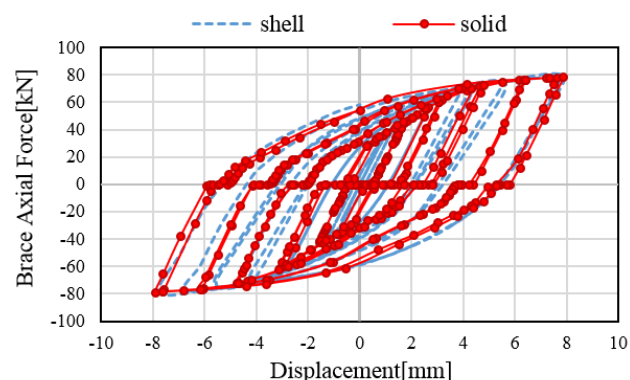
بارگذاری چرخه‌ای اعمالی بر نمونه مطابق پروتکل بارگذاری ATC-۲۴ در شکل ۱۵ و منحنی هیستریزس مهاربند تحت این بارگذاری در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

مطابق با توزیع تنش ون مایسز در مهاربند که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، تنش ایجاد شده برای تمامی پره‌ها تقریباً یکسان است که این موضوع نشان‌دهنده مناسب بودن ابعاد و مصالح غلاف و



شکل ۱۲. بارگذاری چرخه‌ای اعمال شده براساس [۲۰] ATC-۲۴ برای مقایسه مدل اصلی و مدل جایگزین

Fig. 12. Loading protocol applied to the brace according to the ATC-24 for Comparison of alternative and original model



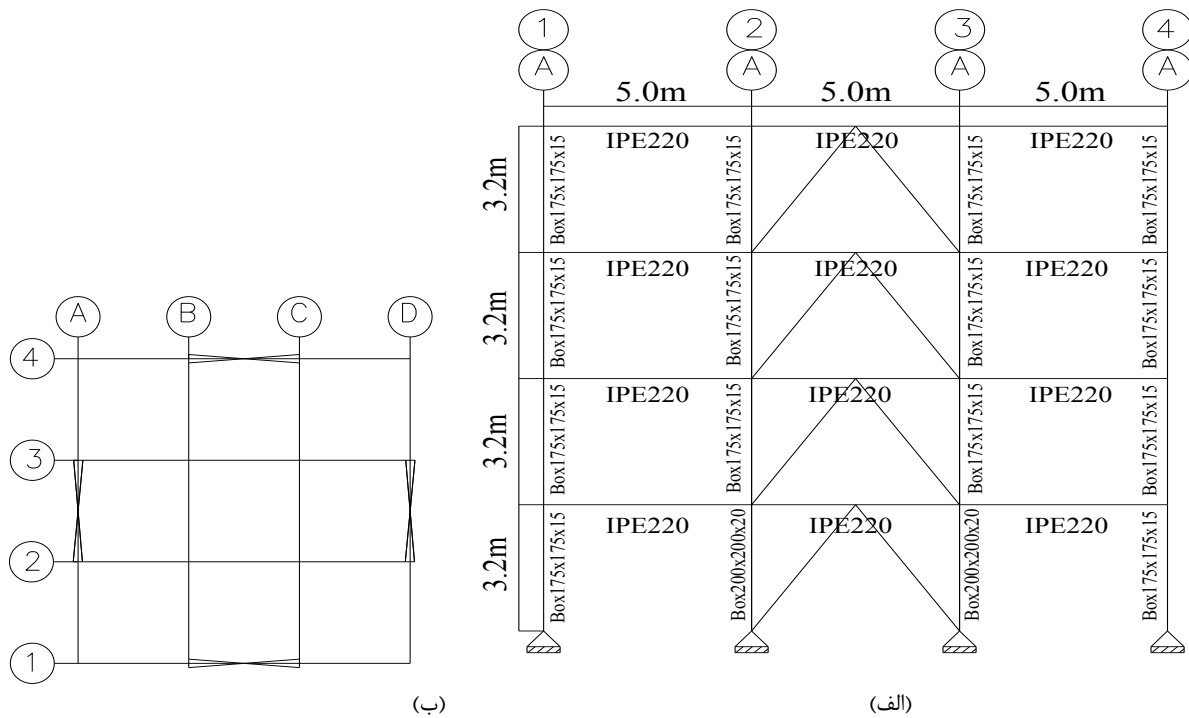
شکل ۱۳. منحنی هیستریزس مهاربند با یک پره در دو حالت پوسته و سالیید

Fig. 13. Hysteresis curve obtained from solid elements and shell elements

همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است منحنی هیستریزس حالت سالیید روی محور افق دارای لغزش است. علت این لغزش رواداری در نظر گرفته شده به منظور قرارگیری مناسب پره‌ها در شیار موجود در سطح داخلی غلاف است.

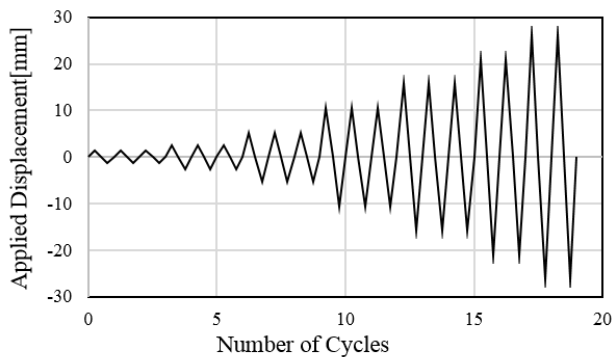
با بررسی نتایج فوق و اطمینان از دقت قابل قبول نتایج در استفاده از مدل جایگزین، در مدل‌های نهایی برای مدل‌سازی مهاربند، المان‌های پوسته جایگزین المان‌های سالیید شده‌اند. لازم به ذکر است، سازه‌های فلزی تحت شرایط با بارگذاری شدید (مانند زلزله، نشست تکیه گاهی و ...) ممکن است در طول عمر خود تحت تغییرشکل‌های بزرگ قرار گرفته که منجر به شکست تحت بارگذاری فزاینده یا خستگی چرخه پایین قرار گیرند (تعداد چرخه‌های زیر ۱۰۰) [۲۴] در این تحقیق اثر شکست شکل پذیر در مدل‌سازی اجزا محدود نادیده گرفته شده و سیستم به گونه‌ای طراحی گردیده که تغییرشکلها در محدوده تغییرشکل‌های بزرگ قرار نمی‌گیرند.

۵- فرآیند طراحی و مدل‌سازی مهاربند پره‌ای برای یک نمونه



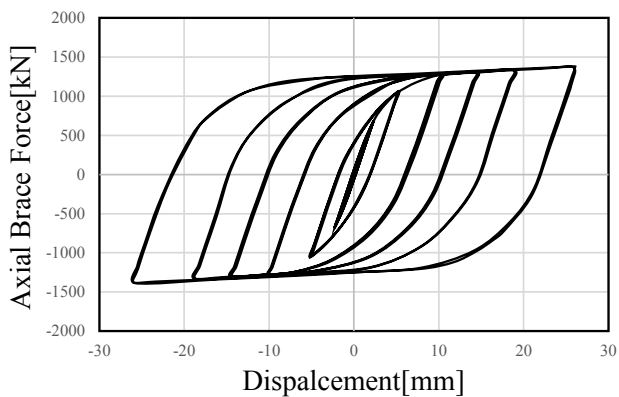
شکل ۱۴. (الف) پلان و (ب) قاب ساختمانی مورد نظر

Fig. 14. (a) Plane and (b) elevation of considered building



شکل ۱۵. بارگذاری چرخه‌ای اعمالی بر مهاربند براساس ATC-24

Fig. 15. The loading protocol applied to the brace according to the ATC-24



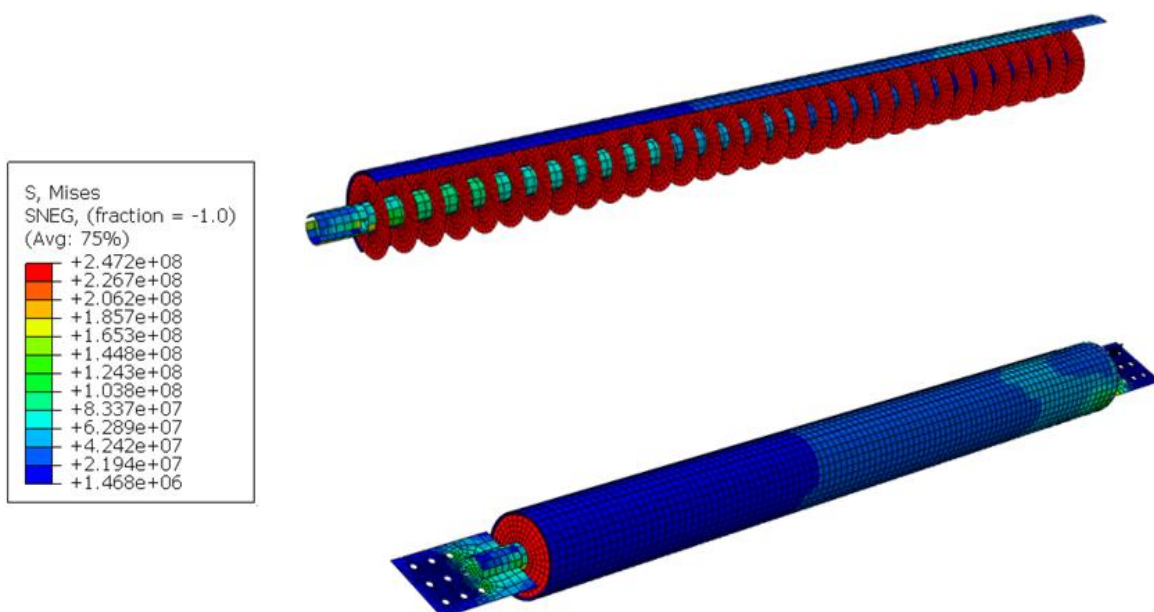
شکل ۱۶. منحنی هیستریزیس مهاربند مدل‌سازی شده

Fig. 16. Hysteresis response of the modeled FBS

جدول ۳. مشخصات مهاربند پره‌ای مدل‌سازی شده

Table 3. Specification of modeled FBS

نوع المان		ابعاد	
پره	S4R	شعاع داخلی	۵۰
		شعاع خارجی	۱۴۰
		ضخامت	۸
شفت	S4R	تعداد	۳۲
		طول	۳۵۰۰
		شعاع داخلی	۳۷
غلاف	S4R	شعاع خارجی	۵۰
		طول	۳۵۰۰
		شعاع خارجی	۱۵۵
		ضخامت	۱۵



شکل ۱۷. توزیع تنش مهاربند پره‌ای مدل شده بر حسب [Pa]

Fig. 17. Stress distributions of FBS (Pa)

حالت یکی از پارامترها متغیر و باقی پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است.

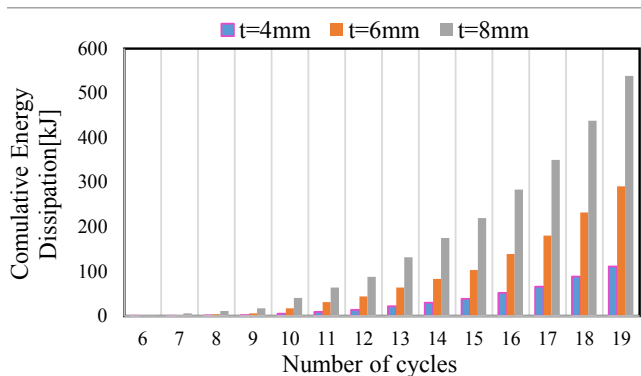
۶-۱- ضخامت پره‌ها

برای بررسی تأثیر ضخامت پره بر روی رفتار مهاربند، ضخامت پره‌ها برای مهاربند طراحی شده به ۴ و ۶ میلی‌متر کاهش پیدا کرد. نمودارهای نیرو-تغییر مکان و استهلاک انرژی به طور مقایسه‌ای به ترتیب در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ ترسیم گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر سه نمونه از منحنی‌های هیستریزس پهن و پایداری برخوردار هستند. با افزایش ضخامت، میزان نیروی تحمل شده توسط

شفت است که منجر به تسلیم تقریباً یکنواخت پره‌ها در طی بارگذاری می‌شود. از طرفی توزیع تنش در شفت و غلاف بدین صورت است که در انتهای متصل به قاب بیشترین تنش و در سر آزاد کمترین تنش بوجود آمده است.

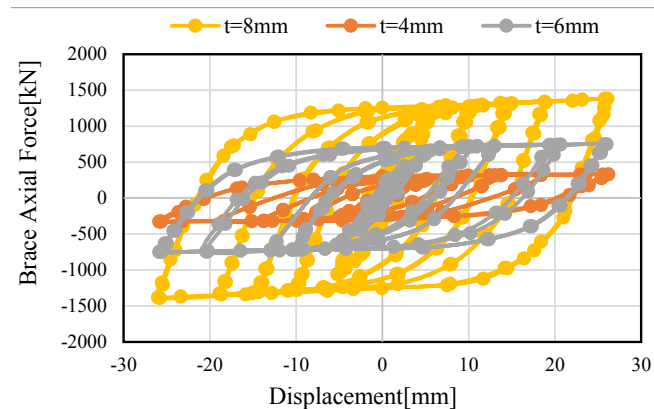
۶-۲ بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار مهاربند

در این بخش نحوه تأثیرگذاری پارامترهای مختلف مانند: تعداد (فاصله) پره‌ها، سطح مقطع شفت و غلاف، شعاع پره و ضخامت آن‌ها بر روی رفتار مهاربند طراحی شده برای سازه شکل ۱۴، با کمک منحنی‌های هیستریزس و استهلاک انرژی بررسی می‌شود. در هر



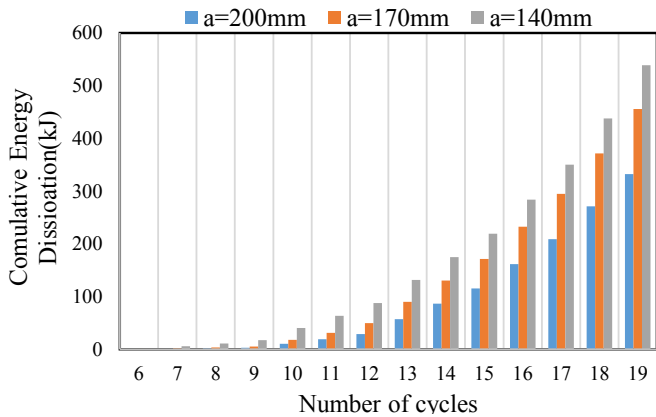
شکل ۱۹. نمودار استهلاک انرژی مهاربند پره‌ای با تغییر در ضخامت پره‌ها

Fig. 19. Energy dissipation diagram of the FBS with change in fan thickness



شکل ۱۸. منحنی هیستریزس مهاربند پره‌ای با تغییر در ضخامت پره‌ها

Fig. 18. Hysteresis curve of the FBS with change in fan thickness



شکل ۲۱. نمودار استهلاک انرژی مهاریند پره‌ای با تغییر در شعاع خارجی پره‌ها

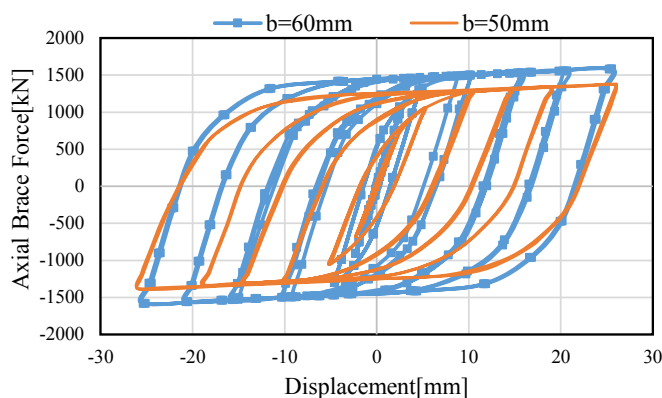
Fig. 21. Energy dissipation diagram of the FBS with change in fan external radius

میلی‌متر در مجموع چرخه‌های بارگذاری به ترتیب ۳۳۳، ۴۵۶ و ۵۳۸ کیلوژول ماست. با توجه به این مقادیر با افزایش شعاع پره‌ها استهلاک انرژی کاهش می‌یابد.

۶-۳- شعاع خارجی شفت (شعاع داخلی پره)

تأثیر شعاع خارجی شفت بر روی مهاریند با تغییر شعاع از ۵۰ میلی‌متر به ۶۰ میلی‌متر بررسی شد.

با توجه به منحنی هیستریزس شکل ۲۲ افزایش شعاع خارجی شفت موجب افزایش نیروی محوری تحمل شده در مهاریند می‌شود. در این حالت نیروی محوری از ۱۳۸۰ به ۱۵۸۲ رسیده است. در این حالت استهلاک انرژی نیز از ۵۳۸ به ۷۱۸ کیلوژول افزایش یافته است. تغییر در شعاع خارجی شفت در واقع تغییر در شعاع داخلی پره‌ها نیز می‌باشد. باید توجه داشت که افزایش شعاع شفت موجب



شکل ۲۲. منحنی های هیستریزس مهاریند پره‌ای با تغییر در شعاع هسته

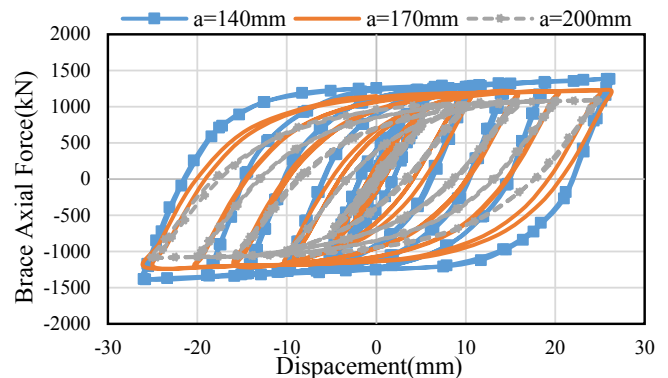
Fig. 22. Hysteresis curves of the FBS with change in shaft radius

مهاریند به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. همان‌طور که در منحنی‌های هیستریزس نمونه‌ها مشاهده می‌شود، حداکثر نیرو برای ضخامت ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر به ترتیب برابر ۳۲۸، ۷۴۸ و ۱۳۸۰ کیلو نیوتن می‌باشد. با کاهش ۵۰ درصدی ضخامت پره‌ها یعنی حالتی که ضخامت ورق از ۸ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر رسیده نیروی محوری مهاریند حدوداً ۷۶ درصد کاهش می‌یابد. از طرفی مهاریندها با ضخامت پره‌های ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر در مجموع چرخه‌های بارگذاری به ترتیب ۱۱۱، ۲۹۱ و ۵۳۸ کیلوژول انرژی مستهلک نمودند. با توجه به این مقادیر با کاهش ۵۰ درصدی ضخامت پره‌ها انرژی مستهلک شده حدوداً ۷۹ درصد کاهش می‌یابد.

۶-۲- شعاع خارجی پره‌ها

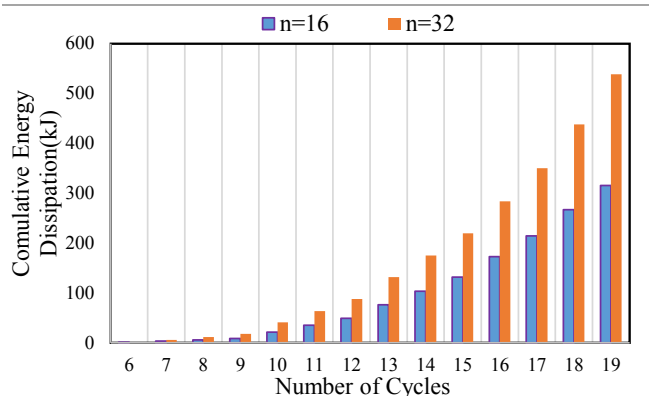
با ثابت نگه داشتن پارامترهای ضخامت پره‌ها، تعداد پره‌ها و سطح مقطع هسته، تأثیر شعاع خارجی پره بر روی رفتار مهاریند بررسی شده است. لازم به ذکر است با تغییر در شعاع خارجی پره سطح مقطع غلاف نیز تغییر می‌کند. در این حالت مهاریند با پره‌هایی با شعاع خارجی ۲۰۰، ۱۷۰ و ۱۴۰ میلی‌متر مدل‌سازی گردید. منحنی‌های هیستریزس و استهلاک انرژی این نمونه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده است.

همان‌طور که از نتایج مشخص است با افزایش شعاع پره‌ها نیروی محوری مهاریند و همچنین میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. حداکثر نیرو برای شعاع‌های ۲۰۰، ۱۷۰ و ۱۴۰ میلی‌متر به ترتیب برابر ۱۰۸۳، ۱۲۲۰ و ۱۳۸۰ کیلو نیوتن محاسبه شده است. میزان استهلاک انرژی در مهاریند با شعاع پره‌های ۲۰۰، ۱۷۰ و ۱۴۰



شکل ۲۰. منحنی هیستریزس مهاریند پره‌ای با تغییر در شعاع خارجی پره‌ها

Fig. 20. Hysteresis curve of the FBS with change in fan external radius



شکل ۲۵. نمودار استهلاک انرژی در مهاربند پره‌ای با تغییر در تعداد پره‌ها

Fig. 25. Energy dissipation diagram of the FBS with different number of fans

صورتی که شفت تسلیم شود نتیجه‌گیری فوق برقرار نخواهد بود. نمودار انرژی مستهلک شده در مقابل گام‌های بارگذاری در شکل ۲۵ نشان داده شده است. حداکثر انرژی مستهلک شده در مهاربند با ۳۲ پره برابر ۵۳۸ کیلوژول و برای مهاربند با ۱۶ پره ۳۱۶ کیلوژول است که نشان‌دهنده کاهش ۴۱ درصدی انرژی مستهلک شده در این حالت است.

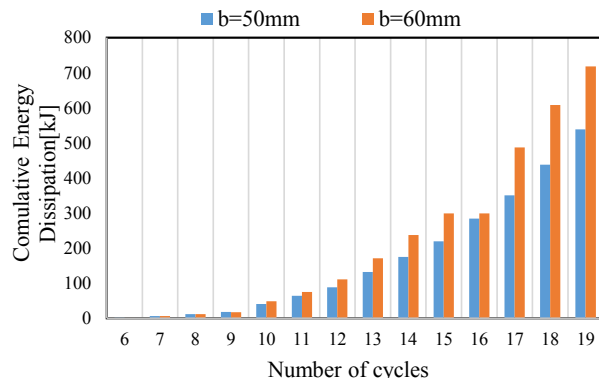
۷- مقایسه مهاربند پره‌ای با مهاربند کمانش تاب

به منظور مقایسه مهاربند پره‌ای با رقیب خود یعنی مهاربند کمانش تاب و بررسی مزیت‌های مهاربند پره‌ای، یک نمونه یک متری از این مهاربند مدل‌سازی شده با نمونه یک متری از مهاربند کمانش تاب که توسط میرطاهری و همکاران [۲۷] مورد آزمایش قرار گرفته است (شکل ۲۶ را ببینید)، مقایسه می‌شود. به منظور امکان مقایسه رفتار نمونه‌ها تحت بار مشابه تغییرمکان تسلیم در هر دو سیستم یکسان در نظر گرفته شده است.

۷-۱- مشخصات مهاربند کمانش تاب

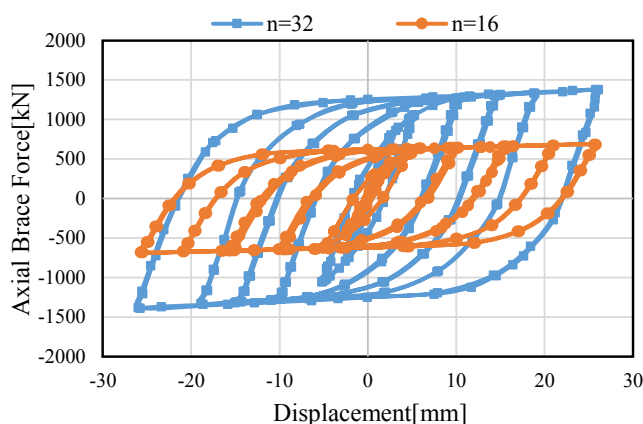
ابعاد و مشخصات مهاربند کمانش تاب مورد بررسی به ترتیب در شکل ۲۶ و جدول ۴ نشان داده شده است. در این آزمایش مهاربند به کمک یک جک هیدرولیکی به صورت رفت و برگشتی تحت تغییرمکان چرخه‌ای قرار گرفته است. میزان نیروی جک و تغییرمکان ایجاد شده به عنوان نتایج به دست آمده ثبت و نمودار نیرو-تغییرمکان ترسیم شده است.

مهاربند فوق بصورت المان C^3D^8R ، که یک المان ۳ بعدی



شکل ۲۳. نمودار استهلاک انرژی مهاربند پره‌ای با تغییر در شعاع هسته

Fig. 23. Energy dissipation diagram of the FBS with change in shaft radius



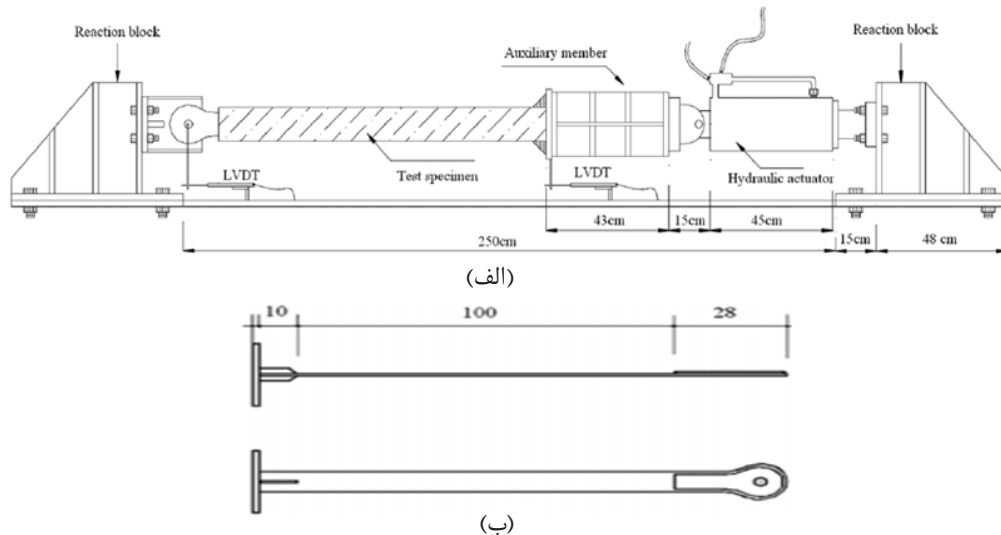
شکل ۲۴. منحنی‌های هیستریزس مهاربند پره‌ای با تغییر در تعداد پره‌ها

Fig. 24. Hysteresis curve of the FBS with different number of fans

سنگین‌تر شدن مهاربند شده و از نظر اقتصادی هم توجیه پذیر نیست. به همین علت منطقی است که در طراحی مهاربند کمترین شعاعی که هدف الاستیک ماندن شفت را اکتان کند به عنوان شعاع شفت انتخاب شود.

۶-۴- تعداد پره‌ها

تأثیر تعداد پره‌ها بر روی نمودار پوش مهاربند موردنظر با نصف کردن تعداد آن‌ها بررسی شد. در شکل ۲۴ منحنی هیستریزس مهاربند با ۱۶ و ۳۲ پره ترسیم شده است. نیروی محوری مهاربند با ۳۲ پره برابر ۱۳۸۰ کیلو نیوتن و با ۱۶ پره ۶۸۰ کیلو نیوتن به دست آمد. همان‌طور که انتظار می‌رفت با کاهش ۵۰ درصدی تعداد پره‌ها نیروی محوری مهاربند هم ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. نتیجه به دست آمده نشان‌دهنده الاستیک ماندن شفت در طی بارگذاری است. در



شکل ۲۶. (الف) پیکره ستاپ آزمایشی، (ب) ابعاد مهاربند کماتش تاب [۲۷]
 Fig. 26. (a) Test setup, (b) Dimensions of the BRB [27]

مهاربند کماتش تاب در شکل ۲۸ این نیرو برابر ۸۰ کیلونیوتن برآورد گردید. مشخصات مهاربند پره‌ای مدل‌سازی شده در جدول ۵ آمده است. همچنین مشخصات مصالح مطابق جدول ۳ می‌باشد. مهاربند پره‌ای مدل‌سازی شده در شکل ۲۷-ب نشان داده شده است. مدل‌سازی مهاربند پره‌ای مشابه روند ذکر شده در بخش ۴ انجام شده است. بارگذاری بر هر دو مهاربند براساس (FEMA-۴۵۰-۲۰۰۳) [۲۸] مطابق شکل ۲۹ به صورت تغییرمکان کنترل اعمال

جدول ۴. مشخصات مکانیکی فولاد در ساخت مهاربند کماتش تاب [۲۷]
 Table 4. Mechanical properties of steel in the manufacture of BRB [27].

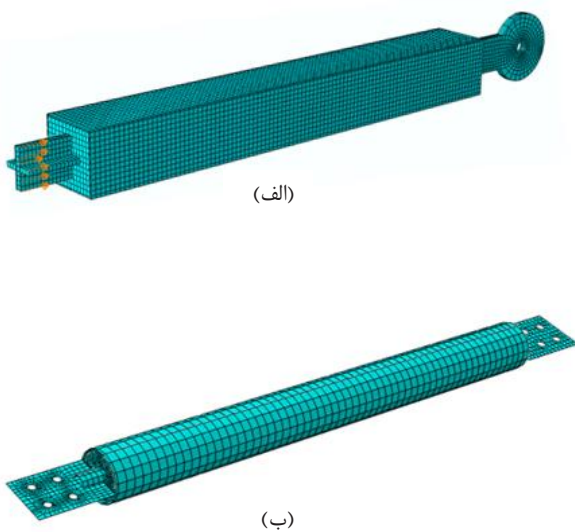
قالب پیرامونی	هسته مهاربند	
۲۱۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰	مدول الاستیسیته [MPa]
۰/۳	۰/۳	نسبت پواسون
۳۷۰	۲۹۷/۵	تنش تسلیم [MPa]
۴۰۵	۴۵۰	تنش نهایی [MPa]

۸ گره‌ای مکعبی شکل با انتگرال‌گیری کاهش یافته است در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد. برای شبیه‌سازی عدم اصطکاک میان بتن و هسته تماس سطح به سطح با ضریب اصطکاک صفر و همچنین تماس میان بتن و قالب بیرونی، سطح به سطح با ضریب اصطکاک ۰/۳ تعریف شد. شکل ۲۷-الف، نمای کلی و شیوه‌ی اعمال بار بر مهاربند کماتش تاب را نشان می‌دهد.

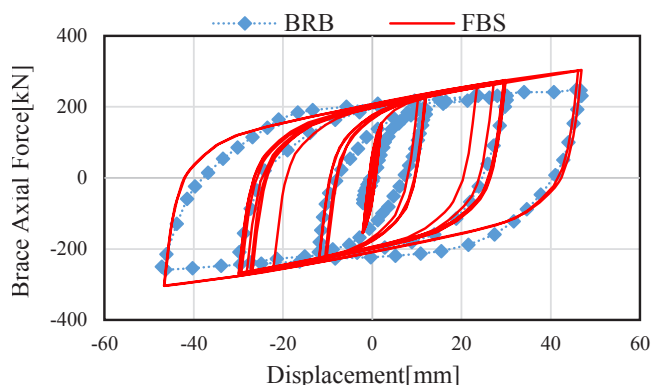
نمودار نیرو-تغییرمکان مدل عددی در برابر نتایج آزمایشگاهی در شکل ۲۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود این دو نمودار مطابقت مناسبی با یکدیگر دارند و خطای مدل‌سازی کمتر از ۵ درصد است.

۲-۷- مدل‌سازی مهاربند پره‌ای

به منظور طراحی مهاربند پره‌ای نیازمند نیروی معادل اولین تسلیم هستیم که با توجه به منحنی چرخه‌ای به دست آمده از

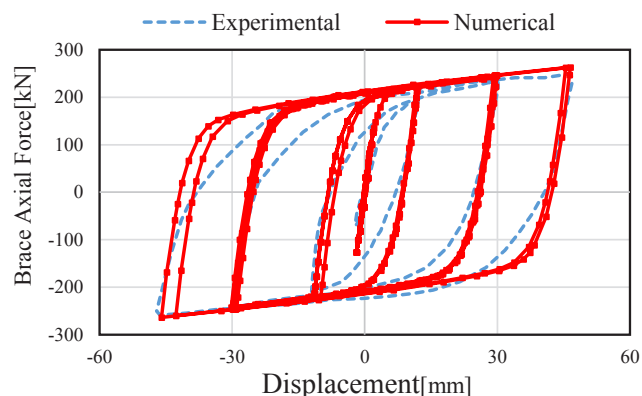


شکل ۲۷. مدل اجزا محدود نمونه یک متری (الف) مهاربند کماتش تاب و (ب) مهاربند پره‌ای
 Fig. 27. The finite element model of one-meter sample of (a) BRB and (b) FBS



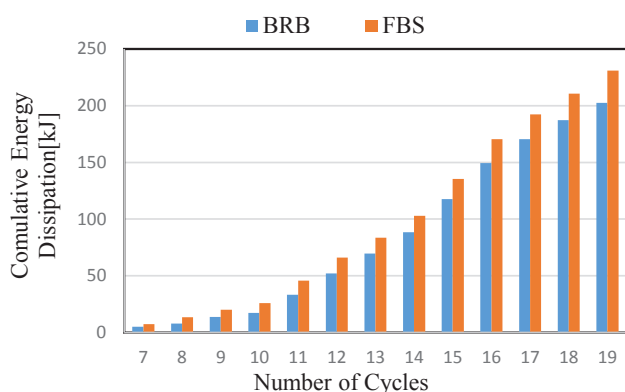
شکل ۳۰. منحنی هیستریزیس مهاربند کمانش تاب در مقایسه با مهاربند پره‌ای تحت بارگذاری چرخه‌ای (FEMA-450 2003)

Fig. 30. Hysteresis curves of FBS and BRB under cyclic loading according to (FEMA-450, 2003)



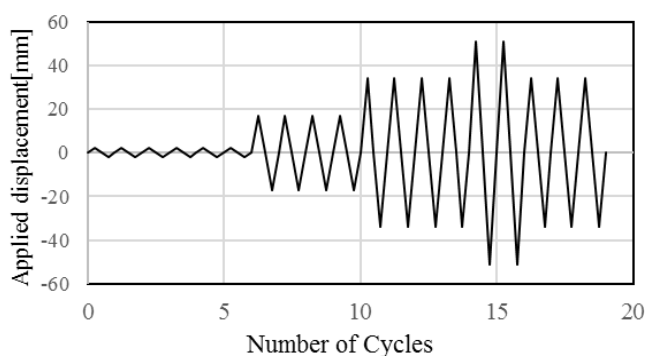
شکل ۲۸. منحنی های هیستریزیس مدل عددی مهاربند کمانش تاب در مقابل نتایج آزمایشگاهی

Fig. 28. Hysteresis curves of analytical model against experimental results of BRB



شکل ۳۱. مقایسه مهاربند پره‌ای با مهاربند کمانش تاب از نظر جذب انرژی

Fig. 31. Comparing between the FBS and BRB in terms of energy dissipation



شکل ۲۹. بارگذاری اعمال شده بر نمونه براساس (FEMA-450 2003)

Fig. 29. Loading protocol applied to the model according to (FEMA-450, 2003)

شده است. (جهت مقایسه و اعتبار نتایج از پروتکل عنوان شده در مرجع [۲۷] استفاده شده است.)

شکل ۳۰ منحنی هیستریزیس مهاربند پره‌ای را در مقابل مهاربند کمانش تاب نشان می‌دهد.

دو مهاربند می‌توانند بر اساس معیارهایی چون وزن، جذب انرژی و میرایی ویسکوز معادل مقایسه شوند:

۷-۳- مقایسه دو مهاربند از نظر جذب انرژی

به منظور مقایسه استهلاک انرژی در دو مهاربند، نمودار استهلاک انرژی در برابر چرخه‌های بارگذاری برای مهاربند پره‌ای ترسیم و با نمودار موجود در مرجع [۲۷] برای مهاربند کمانش تاب مقایسه شد. شکل ۳۱ این دو نمودار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است استهلاک انرژی در مهاربند پره‌ای نسبت به مهاربند کمانش تاب

جدول ۵. ابعاد انتخاب شده برای نمونه یک متری مهاربند پره‌ای
Table 5. Specification of 1-meter sample of FBS

ابعاد		نوع المان	
۲۰	شعاع داخلی	S4R	پره ها
۵۰	شعاع خارجی		
۵	ضخامت		
۱۳	تعداد	S4R	شفت
۱۰۰۰	طول		
۱۰	شعاع داخلی		
۲۰	شعاع خارجی	S4R	غلاف
۱۰۰۰	طول		
۶۰	شعاع خارجی		
۱۰	ضخامت		

با توجه به شکل ۳۲، بیشینه میرایی ویسکوز معادل برای مهاربند پره‌ای ۴۲ درصد است، در حالی که برای مهاربند کمانش تاب ۳۸ درصد محاسبه شده است. بنابراین حداکثر نسبت میرایی مهاربند پره‌ای حدود ۹ درصد بیش‌تر از مهاربند کمانش تاب است که نشان‌دهنده عملکرد بهتر مهاربند پره‌ای است.

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سیستم جاذب انرژی نوینی با نام مهاربند پره‌ای معرفی شده است. مهاربند پره‌ای از سه بخش اصلی تشکیل شده: پره، غلاف و شفت. در این مهاربند، انرژی از طریق شفت به پره‌ها به عنوان فیوز سازه ای منتقل و به کمک تغییر شکل خمشی پره‌ها مستهلک می‌شود. بر اساس نتایج تحلیلی ارائه شده در این مطالعه می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

(۱) با توجه به منحنی‌های هیستریزس متقارن به دست آمده برای مهاربند پره‌ای، همچنین میرایی ویسکوز معادل محاسبه شده مشخص است که این مهاربند تحت بارهای جانبی از عملکرد مطلوب و جذب انرژی بالایی برخوردار است. بنابراین می‌توان از آن در ساختمان‌های جدید و موجود استفاده کرد.

(۲) نظر به آنکه این مهاربند همانند مهاربند کمانش تاب مرسوم دارای منحنی چرخه ای متقارن و جذب انرژی بالایی هستند، مقایسه ای بین آنها انجام یافته است. مهاربندهای پره‌ای به سبب دارا بودن پارامترهای بسیاری چون هندسه، جنس، تعداد، ضخامت و شعاع داخلی و خارجی دیسک‌ها شرایط لازم را برای انتخاب آن‌ها جهت کنترل سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و جذب انرژی فراهم می‌آورد. در حالی که در مهاربندهای کمانش تاب کنترل مشخصات لرزه‌ای سیستم مهاربندی فقط توسط مشخصات هسته، طراح را در تغییر مشخصات سختی، مقاومت، شکل‌پذیری، جذب انرژی توسط فقط پارامترهای سطح و مقاومت تسلیم هسته محدود می‌نماید.

(۳) نتایج مقایسه نمونه یک متری مهاربند پره‌ای با مهاربند کمانش تاب به شرح زیر است:

* حداکثر نسبت میرایی ویسکوز مهاربند پره‌ای حدود ۹ درصد بیشتر از مهاربند کمانش تاب است.

* استهلاک انرژی در مهاربند پره‌ای نسبت به مهاربند کمانش تاب بیشتر است. در چرخه‌های ابتدایی یعنی تغییرمکان‌های کوچکتر این

بیشتر است. در چرخه‌های ابتدایی یعنی تغییرمکان‌های کوچکتر این اختلاف کم و با افزایش تغییرمکان اختلاف انرژی مستهلک شده افزایش می‌یابد.

۷-۴- مقایسه میرایی ویسکوز معادل در دو مهاربند

میرایی ویسکوز معادل در مهاربند پره‌ای به کمک رابطه (۲) محاسبه گردیده است [۲۹]

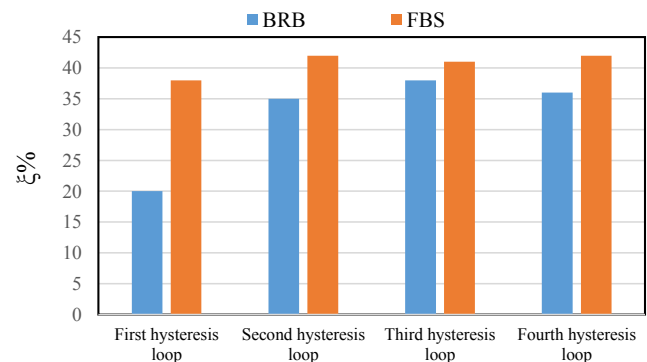
$$\xi = \frac{1}{2\pi} \frac{W_D}{K_{eff} \Delta_{ave}^2} \quad (2)$$

که W_D ناحیه محصور شده به وسیله منحنی نیرو-تغییرمکان و میانگین جابه‌جایی یک عضو طی یک چرخه است. به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود [۲۹]

$$K_{eff} = \frac{|F^-| + |F^+|}{|\Delta^-| + |\Delta^+|} \quad (3)$$

در واقع K_{eff} سختی مؤثر یک عضو در یک چرخه بارگذاری است. صورت و مخرج رابطه (۳) به ترتیب بیانگر حداکثر نیرو و جابه‌جایی تحمل شده در یک چرخه است.

میرایی ویسکوز معادل برای مهاربند پره‌ای محاسبه و به همراه نتایج موجود در مقاله برای مهاربند کمانش تاب در شکل ۳۲ نشان داده شده است. باتوجه به تکرار چرخه‌ها، در هر گروه از تغییرمکان اعمالی میرایی ویسکوز معادل محاسبه و در آخر مقدار میانگین برای هر گروه از چرخه‌ها محاسبه شد.



شکل ۳۲. مقایسه میرایی ویسکوز معادل تقریبی در مهاربند پره‌ای با مهاربند کمانش تاب

Fig. 32. Comparing between the FBS and BRB in terms of equivalent viscous damping

- of Earthquake and Tsunami, 10(04) (2016) 1650004.
- [9] F. Taiyari, F.M. Mazzolani, S. Bagheri, A proposal for energy dissipative braces with U-shaped steel strips, *Journal of Constructional Steel Research*, 154 (2019) 110-122.
- [10] R. Aghlara, M.M. Tahir, A.B. Adnan, Experimental study of Pipe-Fuse Damper for passive energy dissipation in structures, *Journal of Constructional Steel Research*, 148 (2018) 351-360.
- [11] T. Yoshino, Y. Karino, Experimental study on shear wall with braces: Part 2, in: *Summaries of technical papers of annual meeting*, Architectural Institute of Japan, 1971, pp. 403-404.
- [12] P. Clark, Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices, in: *International Post-SMiRT Conference Seminar on Seismic Isolation*, Korea, 1999.
- [13] W. Lopez, Design of unbonded braced frames, in: *Proceedings*, 2001, pp. 23-31
- [14] I.D. Aiken, S.A. Mahin, P. Uriz, Large-scale testing of buckling-restrained braced frames, in: *Japan Passive Control Symposium*, 2002.
- [15] G.R. Kumar, S.S. Kumar, V. Kalyanaraman, Behaviour of frames with non-buckling bracings under earthquake loading, *Journal of constructional steel research*, 63(2) (2007) 254-262.
- [16] M. Shemshadian, S. Razavi, S. Mirghaderi, A. Hosseini, M. Khan Mohammadi, The advantages of reducing the length of yielding segment in seismic performance of buckling restrained braced frames, in: *Sixth International Conference of Seismology and Earthquake Engineering*, 2011.
- [17] A. Jalaefar, B. Asgarian, A simple hybrid damping device with energy-dissipating and re-centering characteristics for special structures, *The structural design of tall and special buildings*, 23(7) (2014) 483-499.
- [18] Abaqus, *Abaqus documentation*, Version, 6 (2014) 1-5.
- [19] B. Payandehjoo, An important of seismic

اختلاف کم و با افزایش تغییرمکان اختلاف انرژی مستهلک شده افزایش می‌یابد.

نتایج فوق نشان می‌دهد که مهاربند پره‌ای پیشنهادی با وزن کمتر، ظرفیت اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل بالاتر می‌تواند یک جایگزین کارآمد برای سیستم مهاربند کمانش تاب باشد.

مراجع

- [1] J.M. Kelly, R. Skinner, A. Heine, Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 5(3) (1972) 63-88.
- [2] P. Boardman, B. Wood, A. Carr, Union house, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 16(2) (1983) 83-97.
- [3] E. Martinez-Romero, Experiences on the use of supplementary energy dissipators on building structures, *Earthquake spectra*, 9(3) (1993) 581-625.
- [4] C.L. Perry, E.A. Fierro, H. Sedarat, R.E. Scholl, Seismic upgrade in San Francisco using energy dissipation devices, *Earthquake Spectra*, 9(3) (1993) 559-579.
- [5] K.-C. Tsai, H.-W. Chen, C.-P. Hong, Y.-F. Su, Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction, *Earthquake spectra*, 9(3) (1993) 505-528.
- [6] S. Beheshti-Aval, H. Mahbanouei, F. Zareian, A hybrid friction-yielding damper to equip concentrically braced steel frames, *International Journal of Steel Structures*, 13(4) (2013) 577-587.
- [7] M. Gray, C. Christopoulos, J. Packer, Cast steel yielding fuse for concentrically braced frames, in: *Proceedings of the 9th US national and 10th Canadian conference on earthquake engineering*, Earthquake Engineering Research Institute and the Canadian Association for ..., 2010.
- [8] B. Payandehjoo, S. Sabouri-Ghomi, P. Ebadi, Seismic behavior of X-shaped drawer bracing system (DBS) and X-braced frames with heavy central core, *Journal*

- Engineering Structures, 60 (2014) 214-222.
- [25] A.S.o.C. Engineers, Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, in, American Society of Civil Engineers, 2016.
- [26] S. Ghayoumi, Seismic Characteristics determination of Fan Bracing System, Master thesis, K. N. Toosi University of Technology, 2018(in Persian).
- [27] M. Mirtaheeri, A. Gheidi, A.P. Zandi, P. Alanjari, H.R. Samani, Experimental optimization studies on steel core lengths in buckling restrained braces, Journal of constructional steel research, 67(8) (2011) 1244-1253.
- [28] B.S.S. Council, NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450), Washington, DC, (2003).
- [29] A.K. Chopra, Dynamics of structures. theory and applications to, Earthquake Engineering, (2001)
- performance of yielding damping damped braced core, PhD Dissertation, K. N. Toosi University of Technology, 2015(in Persian).
- [20] A. Council, Guidelines for cyclic seismic testing of component of steel structures, Redwood City, CA: ATC-24, (1992).
- [21] K.J. Rasmussen, J. Rondal, Strength curves for metal columns, Journal of Structural Engineering, 123(6) (1997) 721-728.
- [22] J. Gozzi, Plastic behaviour of steel: Experimental investigation and modelling, Luleå tekniska universitet, 2004.
- [23] P. Arasaratnam, K. Sivakumaran, M. Tait, True stress-true strain models for structural steel elements, International Scholarly Research Notices, 2011 (2011).
- [24] J. Pereira, A. De Jesus, J. Xavier, A. Fernandes, Ultra low-cycle fatigue behaviour of a structural steel,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

S. B. Beheshti Aval, S. ghayoumi, *Proposing a New Bracing System with Bending Yielding Circular Plates under Cyclic Loading. Amirkabir J. Civil Eng., 53(3) (2021) 1049-1066.*

DOI: [10.22060/ceej.2021.16764.6335](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.16764.6335)

