بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه

بررسی تحلیلی عملکرد لرزه ای یک نوع مهاربند کمانش‌ناپذیر با طول کوتاه (RLBRB) شامل جزئیات جدید

نگارنده:

رضا طهماسبی

استاد راهنما:

دکتر جلیل شفایی

شهریور ۱۳۹۸

شماره: ۹۸/۲۲۴

تاریخ: ۹۸/۷/۲۷

باسمه‌تعالی

دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای رضا طهماسبی با شماره دانشجویی ۹۵۳۳۵۵۴ رشته عمران عنوان پایان نامه: بررسی تحلیلی عملکرد لرزه‌ای یک نوع مهاربند کمانش ناپذیر با طول کوتاه (RLBRB) شامل جزئیات جدید که در تاریخ ۱۳۹۸/۶/۲۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: بسیار خوب) ☑ **مردود** ☐

نوع تحقیق: **نظری** ☐ **عملی** ☐

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱- استادراهنمای اول	دکتر جلیل شفائی	استادیار	[امضا]
۲- استادراهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی گلی	استادیار	[امضا]
۵- استاد ممتحن اول	دکتر وحیدرضا کلاتجاری	دانشیار	[امضا]
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر سید مهدی توکلی	استادیار	[امضا]

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر رضا نادری

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

دانشکده مهندسی عمران - آموزش تحصیلات تکمیلی

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

اثری کوچک است، خیلی کوچک و شاید هیچ؛

اما به یاد عهد قدیم و رسم ندیم، تقدیم می‌شود به:

اولین و مهربان‌ترین آموزگار زندگی‌ام، ***پروردگار یگانه‌ام*** ؛

تقدیم می‌شود به ***پدر و مادر عزیزتر از جانم***؛ آنان که امروز، بیشتر از دیروز و نه به اندازه‌ی فردا، دوستشان دارم...

سپاس

سپاس **خدایی** را که اول و آخر وجود است، بی آنکه اولی بر او پیشی گیرد یا آخری پس از او باشد؛

خدایی که دست هر چشمی از دامان دیدارش کوتاه است و فهم هر کبوتر توصیف‌گری از پرواز در آسمان وصفش عاجز....

برخود لازم می‌دانم از استاد ارجمندم جناب آقای **دکتر جلیل شفایی** که بی‌دریغ مرا در مسیر رسیدن به هدف‌هایم و انجام این پژوهش پشتیبانی کردند، و همچنین از زحمات اساتید ارجمند جناب آقای **دکتر وحیدرضا کلات جاری** و جناب آقای **دکتر سید مهدی توکلی** ودیگر اساتید محترم دانشکده مهندسی عمران که به بنده حقیر در طول این دوره بسیار لطف داشتند نهایت تشکر و قدردانی را داشته باشم. در پایان از تمامی **عزیزانی** که در انجام این تحقیق مرا یاری کردن متشکرم.

تعهد نامه

اینجانب **رضا طهماسبی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی عمران گرایش مهندسی سازه** دانشکده **مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود** نویسنده پایان‌نامه **بررسی تحلیلی عملکرد لرزه ای یک نوع مهاربند کمانش‌ناپذیر با طول کوتاه (RLBRB) شامل جزئیات جدید** تحت راهنمائی **دکتر جلیل شفایی** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایح اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ ....

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده

استفاده از مهاربندهای فولادی در ساختمان‌های با سیستم لرزه بر قاب خمشی می تواند به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر مکان جانبی این سیستم را کنترل کند. مهاربندهای کمانش‌تاب BRBs با حذف کمانش مهاربند در فشار، ایراد مهاربندهای متداول را برطرف کرده است اما مواردی از قبیل وزن بیش از حد، قیمت بالا و اجرای سخت آنها منجر به معرفی نوع جدیدی از مهاربندهای کمانش‌تاب با نام مهاربند طول کوتاه RLBRB گردیده است. در این پژوهش یک ایده جدید و نو آورانه به نام مهاربند کمانش‌تاب طول کوتاه با هسته S شکل معرفی می گردد که علیرغم طول کوتاه می تواند برخی ایراد های سیستم BRB را مرتفع کند و در عین حال به عنوان یک سیستم کنترل غیر فعال عمل کند. لذا ابتدا مدل‌های تحلیلی مهاربندهای RLBRB و BRBs در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS براساس نتایج آزمایشگاهی محققین گذشته صحت‌سنجی می شود. سپس طبق نتایج حاصل از تحلیل، مشخصات مهاربند کمانش‌تاب طول کوتاه با هسته S شکل با مهاربندهای RLBRB و BRB مقایسه می گردد.

نتایج بیانگر بهبود مقادیر پارامترهای سختی اولیه، شکل پذیری، مقاومت و استهلاک انرژی در مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل نسبت به مهاربند BRB است.

بررسی اثر خستگی کم سیکلی نشان می دهد که مهاربند پیشنهادی تا پایان پروتکل بارگذاری استاندارد AISC341 به خوبی توانسته است بدون ایجاد گسیختگی پایدار بماند.

کلمات کلیدی: سیستم کنترل غیر فعال، مهاربند کمانش‌تاب ، هسته S شکل، خستگی کم سیکلی، استهلاک انرژی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱ - Reza Tahmasbi , Jalil Shafaei , "Optimization of seismic specifications of Reduced length BRB with new detailing in tall building" , دانشگاه تهران , یازدهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران تهران , ۱۳۹۷ .

فهرست مطالب

فصل ۱: کلیات ۱
۱-۱- تعریف مسئله ۲
۱-۲- ضرورت انجام تحقیق ۳
۱-۳- اهداف تحقیق ۴
۱-۴- روش انجام تحقیق ۴
۱-۵- ساختار پایان‌نامه ۵

فصل ۲: ۷

مروری بر ادبیات فنی ۷
۲-۱- معرفی ۸
۲-۲- مقایسه مهاربند معمولی و مهاربندکمانش ناپذیر ۱۱
۲-۳- اجزای تشکیل دهنده مهاربندهای کمانشتاب ۱۴
۲-۴- رفتار بخش‌های مختلف هسته در مهاربند کمانشتاب ۱۶
۲-۵- اصول طراحی مهاربند کمانش ناپذیر ۱۸
۲-۶- روش های طراحی مهاربند کمانش تاب ۲۵
۲-۷- روند طراحی مهاربند کمانش تاب به صورت گام به گام ۲۹
۲-۸- مزایا و معایب قابهای مهاربندی مقاوم در برابر کمانش و موارد کاربرد آنها ۳۳
۲-۹- مراحل بارگذاری و معیارهای پذیرش ۳۵
۲-۱۰- پیشرفت های اخیر در زمینه BRBs ۳۶
۲-۱۰-۱- مطالعه ارباشار و همکاران در ترکیه ۳۶
۲-۱۰-۲- مطالعه داوران و همکاران ۴۵
۴۷
۲-۱۰-۳- تحقیقات شارع و همکاران ۴۹
۲-۱۰-۴- مطالعه میرقادری واهل حق ۵۰
۲-۱۰-۵- مطالعه رضوی و همکاران ۵۲
۲-۱۰-۶- تحقیقات ترمبلی و همکاران ۵۸
۲-۱۰-۷- تحقیقات رضوی و همکاران ۶۸

فصل ۳: مدل سازی اجزا محدود ۷۳

۳-۱- مقدمه.. ۷۴
۳-۲- معرفی نرم افزار آباکوس.. ۷۴
۳-۲-۱- بخش‌های پردازش نرم‌افزار.. ۷۶
۳-۲-۲- المان ها در آباکوس.. ۷۸
۳-۳- معرفی نمودار هیسترزیس.. ۷۹
۳-۳-۱- نکاتی در رسم نمودار هیسترزیس.. ۷۹
۳-۳-۲- زوال مقاومت (Strength Degradation) ۸۰
۳-۳-۳- زوال سختی (Stiffness degradaton).. ۸۲
۳-۳-۴-Pinching Effect ۸۳
۳-۳-۵- اثر P - Delta در نمودار هیسترزیس.. ۸۳
۳-۴- مدل سازی RLBRB در نرم افزار اجزا محدود آباکوس ۸۵
۳-۴-۱- مشخصات مدل آزمایشگاهی اریاشار جهت صحت سنجی.............................. ۸۵
۳-۴-۲- مشخصات مدل آزمایشگاهی رضوی جهت صحت سنجی............................... ۹۰
.... ۹۳
۳-۴-۳- مدل سازی مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل..................................... ۹۶

فصل ۴: **۱۰۳**

بررسی رفتار مدل و نتایج **۱۰۳**

۴-۱- مقدمه.. ۱۰۴
۴-۲- بررسی خستگی کم سیکلی(LCF).. ۱۰۵
۴-۲-۲- روش های طراحی و تعیین عمر خستگی... ۱۰۶
۴-۲-۳- تحلیل خستگی کم چرخه تک محوری از رابطه کافین منسون........................ ۱۰۷
۴-۳- کنترل رابطه واتانایب برای غلاف... ۱۱۰
۴-۴- مقایسه میزان سختی مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل با مهاربند طول کوتاه رضوی ۱۱۲
۴-۴-۱- سختی های سری و موازی.. ۱۱۲
۴-۴-۲- خصوصیات فنرهای سری... ۱۱۴
۴-۵- مقایسه میزان کرنش پلاستیک مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل با مهاربند طول کوتاه رضوی
.... ۱۱۵
۴-۶- اثرباوشینگر (Bauschinger effect):.. ۱۱۶
۴-۶-۱- سخت شدگی چرخه ای با کاهش پلاستیک (Cyclic hardening with plastic shakedown):.. ۱۱۷
۴-۷- آنالیز حساسیت مهاربندکمانش تاب پیشنهادی.. ۱۱۸

۴-۸- نتایج تحلیلی مهاربندکمانش تاب طول کوتاه با هسته S شکل........................... ۱۱۹
۴-۸-۱- نمودار هیسترزیس مهاربندS شکل و نحوه توزیع تنش........................... ۱۲۰
۴-۸-۲- محاسبه و مقایسه میزان استهلاک انرژی مهاربند S شکل........................... ۱۲۶
۴-۸-۳- مقایسه میزان سختی اولیه مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل........................... ۱۲۸
۴-۸-۴- ارزیابی میزان شکل پذیری........................... ۱۳۰
۴-۸-۵- ارزیابی مقاومت........................... ۱۳۱
۴-۸-۶- محاسبه مقادیر Δ_{by} و Δ_{bm} ۱۳۲
۴-۸-۷- ارزیابی معیار های پذیرش مهاربند پیشنهادی........................... ۱۳۳
۴-۸-۸- ارزیابی اثرتنش تسلیم برروی نمودار هیسترزیس........................... ۱۳۴
۴-۸-۹- ارزیابی اثر ضخامت هسته بروری میزان استهلاک انرژی........................... ۱۳۵
۴-۹- جمعبندی و نتیجهگیری........................... ۱۳۶

فصل ۵: ۱۳۷

جمع بندی و پیشنهادها ۱۳۷
۵-۱- مقدمه........................... ۱۳۸
۵-۲- جمع بندی و نتیجه گیری........................... ۱۳۸
۵-۳- پیشنهادها برای تحقیقات آینده........................... ۱۳۹

مراجع ۱۴۱

فهرست اشکال

شکل (۲-۱) سمت چپ یک فیوز ترد و شکننده، در مقایسه با فیوز شکل پذیر در شکل سمت راست.... ۹
شکل (۲-۲) گام های مختلف اعمال بار، در بارگذاری سیکلی یک مهاربند.. ۱۰
شکل (۲-۳) تفاوت حلقه‌ی هیسترزیس مهاربند در حالت وقوع کمانش در مقایسه با حالت بدون کمانش ۱۱
شکل (۲-۴) عملکرد دو قاب مهاربندی در دو حالت با کمانش و بدون‌کمانش.................................... ۱۲
شکل (۲-۵) قرارگیری مهاربند های کمانش ناپذیر در قاب.. ۱۳
شکل (۲-۶) اجرای مهاربند کمانش تاب به صورت قطری.. ۱۳
شکل (۲-۷) اجرای بادبند کمانش ناپذیر به صورت شورون در دانشگاه UC-Berkeley.................... ۱۳
شکل (۲-۸) چهار قسمت اصلی تشکیل‌دهنده‌ی بادبند کمانش تاب ۱۵
شکل (۲-۹) انواع سطح مقطع مورد استفاده در BRB ها ۱۶
شکل (۲-۱۰) نواحی مختلف یک مهاربند کمانش تاب ۱۷
شکل (۲-۱۱) قسمت های مختلف یک مهاربند کمانش ناپذیر... ۱۸
شکل (۲-۱۲) نمودار تنش-کرنش مصالح و مفهوم سخت شوندگی کرنشی ۲۰
شکل (۲-۱۳) طول ناحیه‌ی تسلیم شونده در بادبند کمانش ناپذیر BRB... ۲۰
شکل (۲-۱۴) رفتار و تغییر شکل های دو نمونه از مهاربند کمانش ناپذیر پس از تغییرشکل............. ۲۱
شکل (۲-۱۵) نمودار نیرو – جابه جایی مهاربند.. ۲۳
شکل (۲-۱۶) نمونه ای از تست BRB تحت آزمایش بارهای چرخه ای.. ۲۴
شکل (۲-۱۷) سه ناحیه‌ی اصلی تشکیل‌دهنده‌ی مهاربند کمانش ناپذیر BRB.................................. ۲۷
شکل (۲-۱۸) سه ناحیه‌ی اصلی در یک بادبند کمانش تاب BRB واقعی.. ۲۷
شکل (۲-۱۹) روند طراحی قاب های BRBF.. ۳۰
شکل (۲-۲۰) مقاطع مورد استفاده ایاشار و توپکایا در تست ها.. ۳۸
شکل (۲-۲۱) کمانش هسته حول محور قوی ۴۲
شکل (۲-۲۲) کمانش و تغییر شکل موضعی درنمونه ها ۴۳
شکل (۲-۲۳) مقایسه تاثیر انحراف اولیه در رفتار قاب یک طبقه یک دهانه برای تحلیل بار- افزون ۴۶
شکل (۲-۲۴) مقایسه تاثیر انحراف اولیه در رفتار قاب یک طبقه یک دهانه برای تحلیل چرخه ای...... ۴۷
شکل (۲-۲۵) بررسی تاثیر میزان درصد سخت شوندگی کرنشی در رفتار قاب یک دهانه یک طبقه دارای بادبند معمولی برای تحلیل بار- افزون.. ۴۷

شکل (۲-۲۶) بررسی تاثیر میزان درصد سخت شوندگی کرنشی در رفتار قاب برای تحلیل بار- افزون BRB یک دهانه یک طبقه دارای بادبند.. ۴۸
شکل (۲-۲۷) بررسی تاثیر میزان درصد سخت شوندگی کرنشی در رفتار قاب برای تحلیل چرخه ای BRB یک دهانهیک طبقه دارای بادبند.. ۴۸
شکل (۲-۲۸) طول نرمال و کاهش یافته BRBs با موقعیت های مختلف قرار گیری هسته ۵۱
شکل (۲-۲۹) تغییر میزان بار کمانشی با تغییرموقعیت مقطع ضعیف.. ۵۱
شکل (۲-۳۰) جزئیات اعضا مهاربند.. ۵۲
شکل (۲-۳۱) جزئیات مدل آزمایشگاهی مهاربند پیشنهادی رضوی و همکاران........................... ۵۵
شکل (۲-۳۲) جزئیات اعمالی جهت حفظ غلاف برروی هسته.. ۵۶
شکل(۲-۳۳) مجموعه تست تحت قاب تمامی ابعاد به میلی متر.. ۵۹
شکل (۲-۳۴)BRB های تست شده (a) پرشده با بتن(b) تمام فولادی ۵۹
شکل (۲-۳۵) جزئیات هسته ی نمونه ها BRB ۶۰
شکل (۲-۳۶) جزئیات آرایش پیچ ها درنمونه های BRB ۶۲
شکل (۲-۳۷) بارگذاری شبه استاتیکی(راست) بارگذاری دینامیکی(چپ)....................................... ۶۳
شکل (۲-۳۸) پاسخ بار تغییر مکان نمونه های C1 - 1 (a)، C2 - 1 (b)،S1-1(C)،S1-2(d)،S2-1(e)، S2-2(f) اجرای اول(g)S2-2،اجرای دوم(h)HSS ۶۵
شکل (۲-۳۹) تغییر شکل باقیمانده در هسته ۶۶
شکل (۲-۴۰) پاسخ خمشی مهاربند داخل صفحه(راست)مقایسه بین تنش های خمشی پیش بینی شده و اندازه گیری شده(چپ).. ۶۷
شکل (۲-۴۱) جزئیات هسته و غلاف نمونه ۱ .... ۶۹
شکل (۲-۴۲) جزئیات هسته نمونه ۲.. ۷۰
شکل (۲-۴۳) پلان ساختمان ۶ طبقه شامل مهاربندBRB.. ۷۰
شکل (۳-۱) (الف)نمودار بار-زمان،(ب)نمودار جابجایی –زمان،(ج) نمودارهیسترزیس.................... ۸۰
شکل (۳-۲) زوال مقاومت.. ۸۱
شکل (۳-۳) زوال مقاومت در منحنی بار افزون ساختمان های بتنی.. ۸۱
شکل (۳-۴) (الف) زوال مقاومت چرخه ای ، (ب) زوال مقاومت درون چرخه ای ۸۲
شکل (۳-۵) زوال سختی در نمودار هیسترزیس.. ۸۲
شکل (۳-۶)Pinching Effect ۸۳
شکل (۳-۷) نمودار مهاربند CBF تحت بارگذاری متناوب.. ۸۴

شکل (۳-۸) نمودار مهاربند همراه با مراحل کمانش عضو ۸۵
شکل (۳-۹) جزئیات دستگاه آزمایش.. ۸۶
شکل (۳-۱۰) پروتکل بارگذاری استانداردAISC2005.. ۸۶
شکل (۳-۱۱) جزئیات نمونه۱۱.. ۸۷
شکل (۳-۱۲) نمودار بار-تغییر مکان نمونه ۱۱.. ۸۷
شکل (۳-۱۳) مدل مش بندی و مونتاژ شده ارياشار.. ۸۸
شکل (۳-۱۴) مقایسه نمودار مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی ارياشار.. ۸۸
شکل(۳-۱۵) نحوه کمانش موضعی هسته در مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی...................................... ۸۹
شکل (۳-۱۶) نمای سه بعدی از RLBRB در دستگاه ستاپ.. ۹۱
شکل (۳-۱۷) جزئیات مدل سازی نمونه طول بلند.. ۹۳
شکل (۳-۱۸) صحت سنجی مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی در دامنه های کرنشی (۰٫۵ و ۱٫۵)...... ۹۳
شکل(۳-۱۹) مشخصات نمونه رضوی.. ۹۵
شکل (۳-۲۰) صحت سنجی مدل آزمایشگاهی و مدل اجزا محدودی مهاربند طول کوتاه رضوی ۹۶
شکل (۳-۲۱) جزئیات هسته مهاربندطول کوتاه با هسته S شکل.. ۹۷
شکل (۳-۲۲) نمای از بالای مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل ۹۷
شکل (۳-۲۳) قسمت صاف غلاف مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل... ۹۸
.... ۹۸
شکل (۳-۲۴) عضو باکس شکل غلاف مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل...................................... ۹۸
شکل (۳-۲۵) غلاف مهاربندطول کوتاه با هسته S شکل.. ۹۹
شکل (۳-۲۶) نحوه مش بندی مهاربندطول کوتاه با هسته S شکل ۹۹
شکل (۳-۲۷) جزئیات ابعادی المان های سخت کننده، فیلر و End plate مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل.. ۱۰۰
شکل (۳-۲۸) نمایی از مهاربندطول کوتاه با هسته S شکل.. ۱۰۱
شکل (۳-۲۹) پروتکل بارگذاری مهاربندطول کوتاه با هسته S شکل... ۱۰۲
شکل (۴-۱) حالت کلی یک بارگذاری دینامیکی... ۱۰۶
شکل (۴-۲) تحلیل خستگی کم چرخه با استفاده از رابطه کافین- منسون.................................... ۱۰۷
شکل (۴-۳) مجموعه تنش ها با دامنه ثابت... ۱۰۹
شکل (۴-۴) مقطع غلاف مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل و ناحیه بندی آن به منظور محاسبه ممان اینرسی آن.. ۱۱۱

شکل (۴-۵) کف صلب همراه با عناصر مقاوم قائم با آرایش سختی های موازی...................................... ۱۱۲
شکل (۴-۶) آرایش سختی های سری.. ۱۱۳
شکل (۴-۷) نمایش قرارگیری فنرها به صورت سری... ۱۱۴
شکل (۴-۸) اثر باوشینگر.. ۱۱۶
شکل (۴-۹) کاهش پلاستیک.. ۱۱۷
شکل (۴-۱۰) خزش سیکلی... ۱۱۷
شکل (۴-۱۱) آنالیز حساسیت به شبکه بندی.. ۱۱۸
شکل (۴-۱۲) شبکه بندی مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل.. ۱۱۹
شکل (۴-۱۳) نمودار چرخه ای مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل..................................... ۱۲۰
شکل (۴-۱۴) توزیع تنش فون میزز در مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل............................ ۱۲۳
شکل (۴-۱۵) توزیع تنش فون میزز در دامنه های کرنشی مختلف برای مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل ۱۲۴
شکل (۴-۱۶) توزیع کرنش الاستیک برای مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل.......................... ۱۲۵
شکل (۴-۱۷) توزیع کرنش پلاستیک برای مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل......................... ۱۲۶
شکل (۴-۱۸) مقایسه اتلاف انرژی برای مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل و RLBRB............... ۱۲۷
شکل (۴-۱۹) مقایسه اتلاف انرژی برای مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل و BRB.................. ۱۲۷
شکل (۴-۲۰) مقایسه کار خارجی انجام شده برای مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل، BRB و RLBRB ۱۲۷
شکل (۴-۲۱) مقادیر سختی اولیه مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل و BRB........................... ۱۲۸
شکل (۴-۲۲) نمودار بک بون مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل...................................... ۱۲۹
شکل (۴-۲۳) نمودار بک بون مهاربندRLBRB... ۱۲۹
شکل (۴-۲۴) نمودار بک بون مدل آزمایشگاهی رضوی.. ۱۲۹
شکل (۴-۲۵) مقادیر شکل پذیری مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل و BRB.......................... ۱۳۰
شکل (۴-۲۶) ارزیابی مقاومتی مهاربند طول کوتاه باهسته S شکل..................................... ۱۳۱
شکل (۴-۲۷) نحوه تغییر شکل مهاربند طول کوتاه... ۱۳۲
شکل (۴-۲۸) تاثیرات تنش تسلیم بروی نمودار هیسترزیس... ۱۳۴
شکل (۴-۲۹) اثر ضخامت هسته برنمودار هیسترزیس.. ۱۳۵

فهرست جداول

جدول (۲-۱) روشهای مجاز تحلیل و طراحی مهاربندهای کمانش تاب ۲۶

جدول (۲-۲) مشخصات نمونه های تست شده ۶۲

جدول (۲-۳) جزئیات طراحی نمونه ۱ .... ۷۱

جدول (۳-۱) مقادیر سختی اولیه برای مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی ۸۹

جدول (۳-۲) ارزیابی شکل پذیری ۹۰

جدول (۳-۳) ارزیابی مقاومت ۹۰

جدول (۳-۴) مقایسه میزان سختی اولیه مهاربند طول بلند و مقادیر آزمایشگاهی ۹۴

جدول (۳-۵) ارزیابی مقاومت برای مهاربند طول بلند با مدل آزمایشگاهی ۹۴

جدول (۳-۶) ارزیابی میزان شکل پذیری مهاربندBRB و مدل آزمایشگاهی ۹۴

جدول (۴-۱) تعداد چرخه ها و شاخص خرابی برای مهاربندطول کوتاه با هسته S شکل ۱۱۰

جدول (۴-۲) کنترل رابطه واتانایب برای غلاف مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل ۱۱۱

جدول (۴-۳) خصوصیات فنرهای سری ۱۱۵

جدول (۴-۴) مقادیرω و β برای مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل ۱۲۱

جدول (۴-۵) مقادیر ω و β برای مهاربند RLBRB ۱۲۲

جدول (۴-۶) مقادیر ω و β برای مهاربند ERYASHAR ۱۲۲

جدول (۴-۷) مقادیر سختی اولیه مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل و BRB ۱۲۸

جدول (۴-۸) مقادیر شکل پذیری مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل و BRB ۱۳۰

جدول (۴-۹) ارزیابی مقاومتی مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل ۱۳۱

جدول (۴-۱۰) نسبت نیروی فشاری حداکثر به نیروی کششی حداکثر ۱۳۳

فصل ۱:

کلیات

۱-۱- تعریف مسئله

امروزه استفاده از فناوری‌های نوین در جهت بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها، مورد توجه بسیاری از محققین این عرصه واقع شده است. یکی از متداول‌ترین سیستم‌ها برای مقابله با بارهای لرزه‌ای بخصوص در سازه‌های فولادی استفاده از مهاربندهای همگرا به دلیل صرفه اقتصادی، طراحی و اجرای آسان آنها می باشد. اما آنچه که در این مهاربندها باعث عملکرد نامطلوب محوری آنها می شود، کمانش تحت اثر بارهای فشاری است، که منجر به کاهش سختی جانبی می شود. علاوه بر آن تحقیقات انجام شده برروی این مهاربندها بیانگر رفتار چرخه‌ای نامنظم و ناپایدارهمراه با زوال مقاومت بسیارزیاد آنها است. در اینجا لازم است به متفاوت بودن نحوه توزیع نیروهای داخلی، تغییرشکل‌ها با آنچه که به وسیله روشهای رایج طراحی به کار برده می شود اشاره نمود. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که احتمال خرابی قاب‌های مهاربندی شده همگرای متداول در زمین‌لرزه‌هایی با احتمال وقوع ۲درصد در ۵۰ سال به علت گسیختگی مهاربند در اثر پدیده خستگی کم سیکلی بیش از ۳۰ درصد است. تحقیقات بسیاری صورت گرفته است تا بتواند محدودیت‌های مهاربندهای همگرای متداول را رفع نماید به گونه‌ایکه بتوان شاهد رفتار یکسان در فشار و کشش بود. لذا ایده مهاربند کمانش‌تاب شکل گرفت به طوریکه به عنوان یک مکانیزم خارجی در محل کمانش عمل می‌کند. اما این مهاربندها نیز دارای محدودیت هایی از جمله : قیمت بالا، اجرای سخت و دردسترس نبودن به دلیل امتیاز تجاری و انحصاری، تنوع مشخصات فولاد به خصوص در مناطقی که فولادها با خواص مختلف بدون کنترل عرضه می شوند و می‌توانند در رفتار مهاربندها تاثیر نامطلوبی را اعمال نمایند، هستند. لذا در این پژوهش سعی بر آن است تا با ارائه جزئیات خاص محدودیت های ذکر شده را تا حد قابل قبولی مرتفع نمود.

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

رفتار لرزه‌ای مهاربندهای معمولی و مرسوم دارای مشکلات مختلفی است. از جمله این مشکلات می توان به شکل پذیری و منحنی هیسترزیس این دسته از مهاربندها اشاره کرد. مهاربندهای معمول ومرسوم دارای منحنی هیسترزیس نامتقارن در کشش و فشار هستند و همچنین در هنگام رفتار غیرالاستیک سازه، تحت بارهای وارده دچار کمانش می شوند. در این میان مهاربندهای کمانش‌ناپذیر به عنوان نسل جدید سیستم مهاربندی پیشنهاد شده‌اند و به دلیل عملکرد عالی و تأثیرگذاری خوب آنها در برابر زلزله، در سازه ها مورد استفاده قرار می گیرند. این دسته از مهاربندها در مقایسه با مهاربندهای هم مرکز معمولی از مقاومت فشاری بالاتری برخوردار هستند. در مهاربندهای کمانش‌ناپذیر مقاومت در برابر بار وارده و مقاومت در برابر کمانش از یکدیگر تفکیک شده‌اند و این مسئله سبب افزایش مقاومت و شکل پذیری آن ها می شود. در این مهاربندها هسته فولادی شکل در برابر تنش‌های محوری مقاومت می کند و مکانیزم مقاوم در برابر کمانش (غلاف) هم هسته مرکزی را در برابرکمانش مقاوم می‌سازد. طراحی صحیح مهاربند کمانش‌ناپذیر این امکان را بدست می دهد تا مفصل‌های پلاستیک ناشی از کمانش در مهاربند ایجاد نشده و این مسئله سبب افزایش ظرفیت محوری فشاری و ظرفیت استهلاک انرژی سیستم می شود. در سیستم BRB [۱] کاهش مقاومت به علت ناپایداری بوجود نخواهد آمد و طول مؤثر هسته را می توان صفردر نظر گرفت. در حالی که سیستم CBF [۲] تمایل بیشتری به کمانش تحت بار وارده دارد و بدین ترتیب قابلیت استهلاک انرژی و ظرفیت محوری نسبت به سیستم کمانش‌ناپذیر کمترخواهد بود. در سیستم مهاربندهای هفتی و هشتی، تیرها می بایست در برابر نیروهایی که در اثر عدم تعادل بین ظرفیت کششی و فشاری در این مهاربندها ایجاد می شود مقاومت کنند، که

[۱] Buckling Restrained Brace

[۲] Convertible Bracing Frame

در اثر این مقاومت سختی سازه کاهش خواهد یافت و همچنین این مهاربندها تمایل به کمانش در اثر بار وارده را دارند. در نتیجه این سیستم از مهاربندها نسبت به سیستم مهاربند کمانش ناپذیر قابلیت استهلاک انرژی کمتری را دارا می باشد. قاب‌های مهارشده با مهاربندکمانش‌ناپذیر (BRBF)[۱] منحنی هیسترزیس مناسب و ظرفیت های شکل پذیری بالایی از خود نشان داده‌اند که در پاسخ لرزه‌ای شان منعکس شده است.

۱-۳- اهداف تحقیق

هدف اصلی در این تحقیق، معرفی و بررسی نوعی از مهاربند مقید در برابر کمانش با جزئیات جدید(هسته S شکل) است که در آن سعی شده در راستای مطالعات اخیر، طول تسلیم شونده و در نتیجه طول غلاف کوتاهتر شود. همچنین از مصالح پرکننده استفاده نشود تا مهاربند قابلیت بازرسی بعد از زلزله را داشته باشد و مشکلات اجرایی آن نیز به حداقل برسد. بر روی مدل پیشنهادی تحلیل المان محدود در ABAQUS انجام خواهد گرفت تا نقاط ضعف و قوت آن مشخص شود.

۱-۴- روش انجام تحقیق

با توجه به ظرفیت بالای فولاد در ناحیه پُست الاستیک ایده کاهش طول بخش تسلیم شونده BRBs مورد بررسی قرار می‌گیرد .کاهش طول بخش تسلیم‌شونده یکی از اصلاحاتی است که سبب بهبود برخی از پارامترهای BRBs نظیر سختی می شود. با این وجود در مهاربندهای RLBRB [۲]به دلیل حاکم شدن پدیده خستگی کم سیکلی نمی‌توان طول مهاربند را بیش از حد کاهش داد تا بتوان به عنوان یک

[۱]Buckling Restrained Brace Frame

[۲] Reduced Length Buckling Restrained Brace

سیستم غیر فعال بعد از زلزله قابلیت تعویض داشته باشد. در این تحقیق یک ایده جدید و نو آورانه به نام مهاربند کمانش‌تاب طول‌کوتاه با هسته S شکل معرفی می گردد که علیرغم طول بسیار کوتاه می تواند برخی ایرادهای سیستم RLBRB و BRB را مرتفع کند و در عین حال به عنوان یک سیستم کنترل غیر فعال عمل کند. لذا ابتدا مدل های تحلیلی مهاربندهای RLBRB و BRBs را در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS براساس نتایج آزمایشگاهی محققین گذشته صحت سنجی می‌کنیم. سپس طبق نتایج حاصل از تحلیل، مشخصات مهاربند کمانش‌تاب طول کوتاه با هسته S شکل با مهاربندهای RLBRB و BRB مقایسه می گردد. نتایج حاصل از مقایسه طرح پیشنهادی با مهاربندهای کمانش‌تاب متداول بیانگر این است که علیرغم کوچکتر و سبکتر بودن این مهاربندها رفتاری مشابه مهاربندهای BRB متداول دارند.

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

پایان نامه پیش‌رو در پنج فصل تنظیم شده است که خلاصه مطالب ذکر شده در هر فصل به صورت زیر می‌باشند:

فصل اول: در این فصل به ارائه کلیات، ضرورت انجام تحقیق، اهمیت موضوع و روش تحقیق پرداخته شده است.

فصل دوم: در این فصل به بررسی تاریخچه و ادبیات فنی موجود در زمینه‌ی مهاربندهای کمانش‌تاب پرداخته شده است.

فصل سوم: در این فصل شرح کامل مدل پیشنهادی، خصوصیات مصالح مصرفی، چگونگی ساخت مدل در نرام افزار آباکوس و صحت سنجی نتایج به طور کامل شرح داده شده است.

فصل چهارم: نتایج مربوط به تحلیل اجزا محدودی مدل پیشنهادی ارائه شده است.

فصل پنجم: در این فصل به جمع‌بندی نتایج تحقیقات انجام گرفته در این پژوهش پرداخته شده و در

انتها نیز پیشنهادهایی جهت انجام تحقیقات بیشتر و جامع‌تر در بحث حاضر عنوان می‌گردد.

فصل ۲:

مروری بر ادبیات فنی

۲-۱- معرفی

مهاربند کمانش ناپذیر چیست؟

مهاربندها به عنوان یکی از سیستم های باربر جانبی سهم قابل توجهی در مهار کردن نیروهای جانبی دارند اما همانطور که می‌دانید مهاربندها معمولا در تحمل نیروی فشاری دچار کمانش می‌شوند، اما سوال اینجاست که به چه صورتی باید از کمانش مهاربند جلوگیری کنیم؟

مهاربند کمانش‌ناپذیر یا همان مهاربند کمانش‌تاب به علت رفتار متقارنی که در مقابل نیروی کششی و فشاری از خود نشان می‌دهد راه‌حل مناسبی برای کنترل کمانش مهاربند می‌باشد. فولاد به عنوان یکی از اصلی‌ترین مصالح مورد استفاده در ساختمان، قابلیت خوبی در استهلاک انرژی دارد. به این معنا که فولاد پس از تسلیم شدن و با ورود به ناحیه‌ی غیر الاستیک، می‌تواند جابه‌جایی‌های بزرگی را بدون آنکه افت قابل ملاحظه‌ای در مقاومت آن ایجاد شود، تحمل نماید. به این قابلیت مصالح شکل پذیری گفته می شود. در صورتی که یک عضو سازه ای چنین رفتاری داشته باشد و بتواند در هنگام زلزله انرژی ورودی به سازه را مستهلک نماید، این رفتار سبب می شود که سایر بخش‌های ساختمان مانند تیرها و ستون‌ها سالم باقی مانده و آسیب سازه‌ای جدی نبینند. امروزه در بسیاری از سازه‌ها، المان‌هایی به عنوان فیوز سازه‌ای طراحی می‌شوند تا با خرابی این المان که با استهلاک انرژی زلزله همراه خواهد بود، سایر اعضای سازه‌ای آسیب جدی نبینند.

مفهوم المان فیوز در شکل زیر به خوبی قابل درک می‌باشد، در شکل سمت چپ با رسیدن طناب به حد گسیختگی، کل مجموعه‌ی زنجیر به یک باره‌پاره شده که این رفتار، ترد (Brittle) محسوب می شود و در سازه‌های ساختمانی نامطلوب می‌باشد. در شکل سمت راست، با ضعیف‌تر قرار دادن یکی از حلقه‌های زنجیر، این عضوِ ضعیف قبل از سایر حلقه های زنجیر خراب شده و پیش از گسیختگی، دچار تغییرشکل نسبتاً قابل توجهی می‌شود که این رفتار شکل‌پذیر (Ductile) نامیده می‌شود. خرابی

این عضوِ نسبتاً ضعیف سبب سالم ماندن سایر حلقه‌های زنجیر خواهد شد. در این حالت پس از اتمام بارگذاری، در صورت خرابی المان فیوز، به راحتی می‌توان با جایگزین کردن تنها یک المان (یک حلقه از زنجیر)، سیستم را به کارایی اولیه‌ی خود بازگرداند.

شکل (۲-۱) سمت چپ یک فیوز ترد و شکننده، در مقایسه با فیوز شکل پذیر در شکل سمت راست

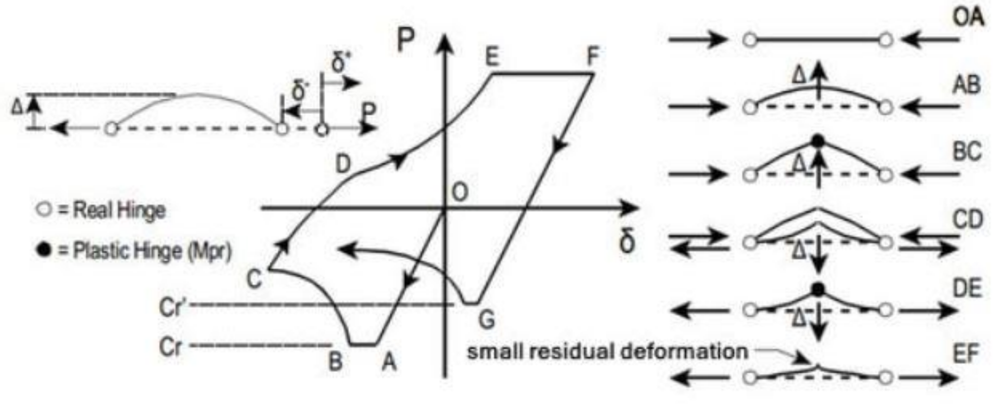
با توضیحات فوق در صورتی که در یک سازه، عضو شکل‌پذیر به دلایل مختلف عملکرد مناسبی از خود نشان ندهد و نتواند انرژی ورودی به سازه را مستهلک کند، این انرژی به سایر اعضای سازه‌ای آسیب خواهد رساند؛ به عنوان مثال در سیستم‌های سازه‌ای با مهاربند همگرا، المان‌های مهاربندی وظیفه‌ی تامین شکل‌پذیری مورد نیاز سازه را دارند اما به دلیل اینکه معمولاً تحت نیروهای فشاری پس از چند سیکل بارگذاری مهاربندهای فولادی دچار کمانش می‌شوند، قابلیت استهلاک انرژی آنها به شدت کاهش می‌یابد و در نتیجه جذب انرژی مطلوب را نخواهند داشت که همین اتفاق سبب خرابی سازه و المان‌های مختلف آن می‌شود.

با بررسی رفتار سیستم مهاربندی در خرابی سازه‌ها، مشخص شد که بزرگترین مشکل این سیستم رفتار نامتقارن مهاربندها در کشش و فشار می‌باشد، به این معنا که مهاربند در کشش تسلیم شده و انرژی را مستهلک می‌نماید اما در فشار به دلیل کمانش نمی‌تواند عملکرد مطلوب داشته باشد.

عموماً برای بررسی رفتار اعضا در زمان زلزله، از آزمایش هایی با بارگذاری سیکلی استفاده می‌شود، بدین معنا که نیروی کششی و فشاری به تناوب به صورت رفت و برگشتی به المان اعمال شده و نحوه‌ی پاسخ

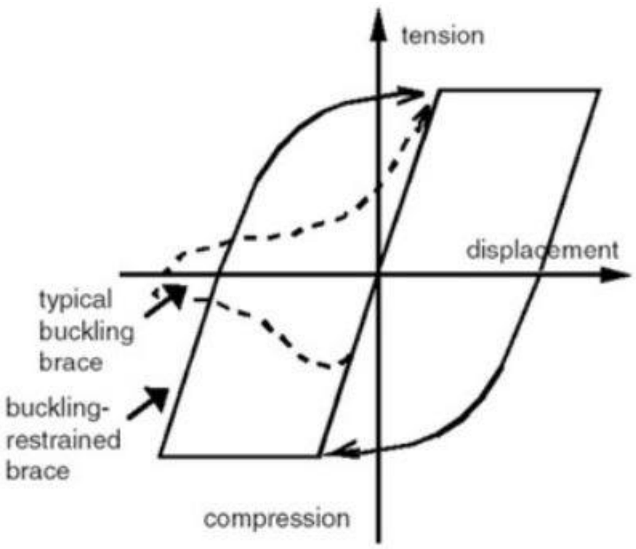
عضو در این بارگذاری بررسی می‌گردد. دلیل انجام چنین آزمایشی، ماهیت رفت و برگشتی نیروی زلزله می‌باشد که جهت نیروی وارده به اعضای سازه‌ای در سیکل‌های مختلف تغییر می‌کند. نتایج بارگذاری سیکلی در قالب یک منحنی به نام منحنی هیسترزیس ارائه می‌شود که در این منحنی جابه‌جایی در مقابل نیرو (نیروی کششی و فشاری) نشان داده می‌شود.

در شکل زیر یک المان مهاربندی تحت کشش و فشار به صورت سیکلی بارگذاری شده و نتایج آن به صورت منحنی هیسترزیس، مشاهده می‌شود. در این تست، ابتدا عضو به صورت فشاری بارگذاری شده و به دلیل کمانش مهاربند تحت فشار، حلقه‌ی هیسترزیس (حلقه‌های منحنی نیرو-تغییرمکان در بارهای رفت و برگشتی)، نامنظم می‌باشد اما با تغییر جهت بارگذاری و تبدیل آن به کشش، رفتار منظم شده و استهلاک انرژیِ قابل توجهی رخ می‌دهد (مساحت زیر نمودار منحنی هیسترزیس، انرژی مستهلک شده‌ی عضو را نشان می‌دهد).



شکل (۲-۲) گام های مختلف اعمال بار، در بارگذاری سیکلی یک مهاربند[1]

در صورتی که از کمانش عضو در فشار جلوگیری شود، حلقه‌ی هیسترزیس به صورت شکل(۲-۳) خواهد بود.



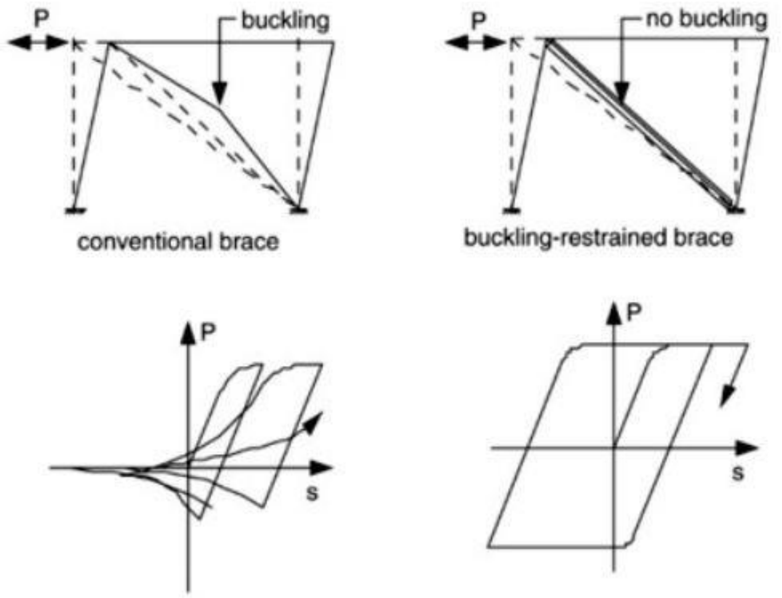
شکل (۲-۳) تفاوت حلقه‌ی هیسترزیس مهاربند در حالت وقوع کمانش در مقایسه با حالت بدون کمانش[2]

از توضیحات فوق می‌توان این‌چنین نتیجه گرفت که در سیستم‌های مهاربندی، نیاز به مهاربندی می‌باشد که با مقاومت بهتر در مقابل کمانش تحت نیروی فشاری، رفتار پایدارتری داشته باشد تا استهلاک انرژی بیشتری توسط این مهاربند در هنگام زلزله رخ دهد.

۲-۲- مقایسه مهاربند معمولی و مهاربندکمانش ناپذیر

با توجه به توضیحات بخش قبل و در جهت بهبود رفتار سیستم مهاربند همگرای فولادی، سیستمی معرفی شده که در آن از کمانش مهاربندها در فشار جلوگیری می‌شود. به این مهاربند، مهاربند کمانش ناپذیر(Buckling Restrained Brace) یا (BRB)گفته می‌شود. همچنین قابی که در آن از مهاربند کمانش‌تاب استفاده شود به اصطلاح، (Buckling Restrained Braced Frame (BRBF نامیده می‌شود. در شکل(۲-۴) عملکرد دو سیستم مهاربندی تحت زلزله در حالتی که مهاربندها بعد از چند سیکل بارگذاری، دچار کمانش شده‌اند، با سیستمی که از کمانش مهاربندها جلوگیری شده، مقایسه شده است. مشاهده می‌شود در حالتی که کمانش مهاربند رخ می‌دهد، حلقه‌های هیسترزیس (حلقه‌های منحنی

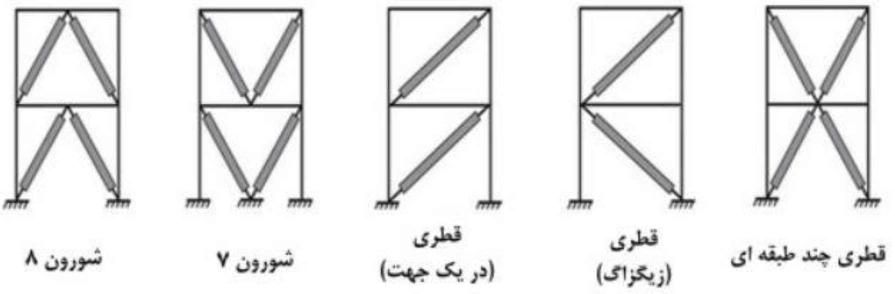
نیرو-تغییرمکان دربارهای رفت و برگشتی) نامنظم بوده و سطح زیر نمودار چندان بزرگ نیست اما زمانی که از مهاربند کمانش تاب استفاده شده، حلقه‌های هیسترزیس به شدت متقارن و سطح زیر نمودار هم بزرگ شده است که نشان از استهلاک انرژی قابل توجه سیستم دارد.



شکل (۲-۴) عملکرد دو قاب مهاربندی در دو حالت با کمانش و بدون‌کمانش[3]

مهاربند کمانش‌ناپذیر در قاب‌های مهاربندی شده به صورت مهاربند همگرا مورد استفاده قرار می‌گیرد و عملکرد چرخه‌ای بسیاری خوبی از خود نشان داده و شکل پذیری زیادی دارند. این سیستم از سال ۲۰۰۵ وارد آیین نامه‌ی ASCE7[1] و از ویرایش چهارم آیین نامه‌ی ۲۸۰۰ وارد آیین نامه های ایرانی شده است، در آیین نامه‌ی ASCE7-16 ضریب رفتار این سیستم ۸ در نظر گرفته شده (در آیین نامه‌ی ۲۸۰۰ این عدد ۷ می‌باشد) که مقایسه‌ی این اعداد با ضریب رفتار ۳/۲۵ و ۶ برای مهاربندهای همگرای معمولی و همگرای ویژه، نشان دهنده‌ی رفتار بسیار شکل پذیر این مهاربندها است. در شکل(۲-۵) روش‌های قرارگیری متداول این مهاربندها در قاب مشاهده می‌شود.

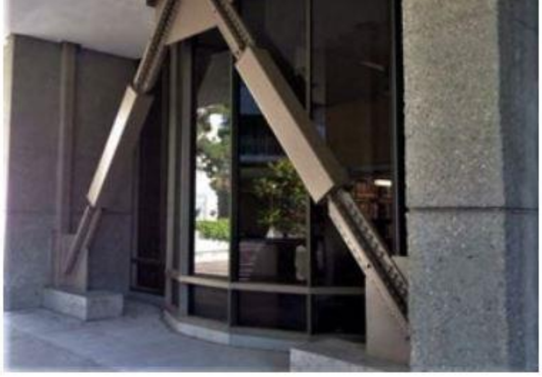
[1] American Society of Civil Engineers



شکل (۲-۵) قرارگیری مهاربند های کمانش ناپذیر در قاب[4]

در ادامه چند نمونه از سازه‌های ساخته شده به کمک مهاربند های کمانش‌تاب مشاهده می‌شوند شکل های(۲-۶)و(۲-۷).

شکل (۲-۶) اجرای مهاربند کمانش تاب به صورت قطری[4]



شکل (۲-۷) اجرای بادبند کمانش ناپذیر به صورت شورون در دانشگاه UC-Berkeley [4]

همانطور که پیش‌تر هم اشاره شد، در سازه‌ها به دلیل اینکه عضوهای فشاری پیش از رسیدن به تنش تسلیم کمانش می‌کنند، در چنین حالتی معمولا امکان رسیدن به صد در صد ظرفیت عضو وجود ندارند. باری که عضو با رسیدن به آن کمانش می‌نماید را بار بحرانی کمانش (Pcr) می‌نامند، بار بحرانی کمانش معمولا به میزان قابل توجهی کوچک تر از باری است که عضو تسلیم می‌شود، اما به دلیل اینکه پس از کمانش، تحمل نیرو توسط عضو تقریبا متوقف می‌شود، طراحی اعضای فشاری به جای نیروی تسلیم بر اساس نیروی (بار بحرانی) کمانش انجام می‌شود.

از آنجایی که در سیستم مهاربند کمانش‌ناپذیر از کمانش مهاربند جلوگیری به عمل می‌آید، می‌توان نتیجه گرفت که هسته‌ی فولادی مهاربند، هم در کشش و هم در فشار می‌تواند تسلیم شود. از این رو می‌توان طراحی عضو را بر اساس تنش تسلیم فولاد (Fy) انجام داد، این درحالیست که در سایر سیستم‌های مهاربندی مرسوم، طراحی بر اساس تنش بحرانی کمانش (Fcr) انجام می‌شود.

۲-۳- اجزای تشکیل دهنده مهاربندهای کمانش‌تاب

مهاربند کمانش‌ناپذیر از چهار بخش اصلی تشکیل شده است:

هسته‌ی فولادی: این قطعه اصلی‌ترین المان تشکیل دهنده‌ی BRB ها است که کشش و فشار محوری ناشی از نیروهای جانبی وارد به سازه را تحمل می کند.

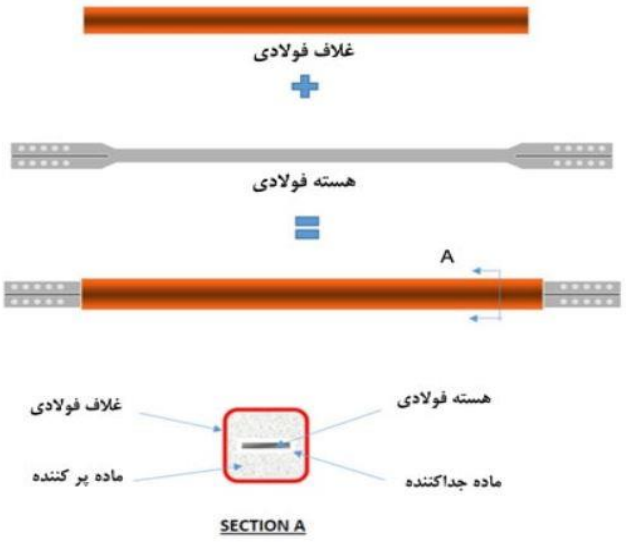
غلاف فولادی : این المان در اطراف هسته قرار گرفته و از کمانش آن جلوگیری می‌کند.

ماده‌ی پرکننده : این بخش بین هسته و غلاف قرار گرفته و در مقابل کمانش مقاومت می‌کند. مصالح مختلفی به عنوان فیلر استفاده می شوند که یکی از مهم ترین آن‌ها بتن است.

ماده‌ی جداکننده : این ماده، هسته را از ماده‌ی پرکننده جدا می‌نماید و سبب می‌شود که هسته بتواند آزادانه حرکت کرده و تحت فشار و کشش، تغییر شکل دهد. همچنین گاهی این آزادی حرکت سبب وارد شدن هسته به مُدهای بالاتر تغییرشکل شده که باعث افزایش قابلیت استهلاک انرژی مهاربند

می‌شود. در صورت چسبندگی فولاد و بتن، رفتار مهاربند تغییر نموده و عملکرد به صورت ترکیبی (compsite) خواهد بود، که چندان مطلوب اهداف طراحی مهاربند کمانش‌ناپذیر نیست.

در شکل(۲-۸) چهار بخش اصلی مهاربند کمانش ناپذیر مشاهده می‌شوند:



شکل (۲-۸) چهار قسمت اصلی تشکیل‌دهنده‌ی بادبند کمانش تاب

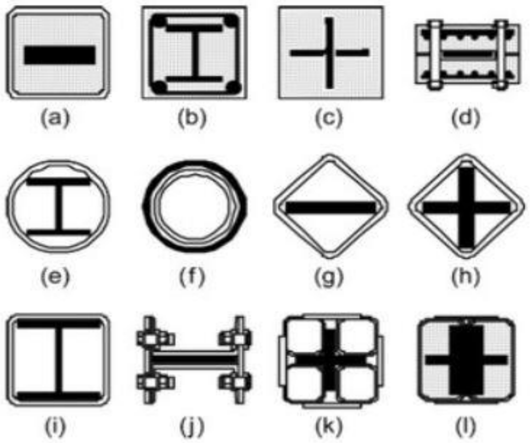
اصلی ترین ویژگی این مهاربند ها، قابلیت تسلیم شدن در کشش و فشار می باشد که رفتاری متقارن ایجاد می نماید.

این مهاربند از یک هسته‌ی فولادی تشکیل شده که از کمانش کلی آن جلوگیری به عمل می‌آید. در این سیستم از چسبندگی هسته‌ی فولادی داخلی، با ماده‌ی پرکننده‌ی بتنی جلوگیری می‌شود تا بتوان عملکرد هسته را به صورت تکی در نظر گرفت. هسته‌ی فولادی ممکن است در حین بارگذاری تسلیم شده که این امر سبب می شود بخشی از انرژی ورودی مستهلک شود. زمانی که عملکرد این هسته به صورت تکی در نظر گرفته می‌شود، امکان ورود هسته‌ی فولادی به مُدهای بالاتر هم وجود دارد که همین امر سبب افزایش قابلیت استهلاک انرژی آن می‌شود.

این در حالیست که، با چسبیدن ماده‌ی پرکننده به هسته‌ی فولادی به نوعی سختی مجموعه بالاتر رفته و المان دیرتر تسلیم می‌شود در نتیجه استهلاک انرژی هم به تاخیر می‌افتد؛ در این حالت، ترکیب

هسته‌ی فولادی و ماده ی پر کننده به صورت یک مجموعه‌ی واحد عمل کرده که استعلاک انرژی آن به مراتب کمتر از حالتی است که عملکرد هسته‌ی فولادی به صورت تکی می‌باشد.

سطح مقطع‌های متفاوتی برای مهاربندهای BRB می‌توان در نظر گرفت که در شکل(۲-۹) مشاهده می‌شوند، امروزه استفاده از مقطع به صورت المان صلیبی و همچنین المان تسمه رایج تر است.



شکل (۲-۹) انواع سطح مقطع مورد استفاده در BRB ها[۵]

۲-۴- رفتار بخش‌های مختلف هسته در مهاربند کمانش‌تاب

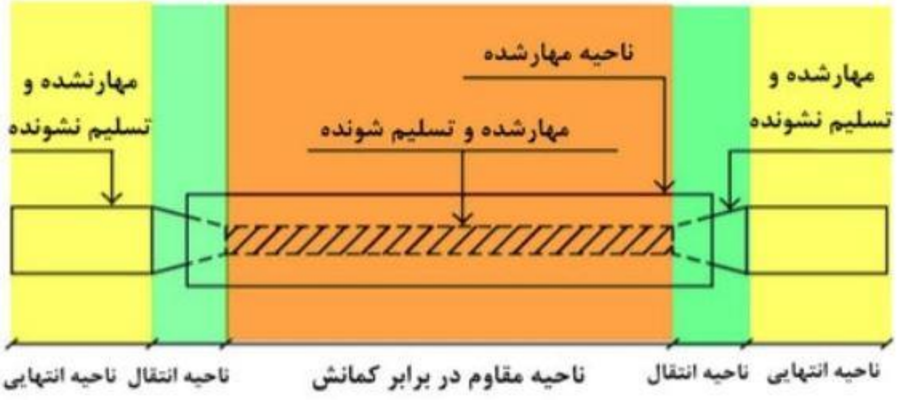
هسته‌ی فولادی مهم ترین بخش یک مهاربند کمانش ناپذیر می‌باشد. سایر بخش‌ها مانند غلاف و ماده ی پرکننده تنها وظیفه‌ی جلوگیری از کمانش هسته‌ی فولادی را بر عهده دارند و هدف از در نظر گرفتن آنها، فراهم شدن شرایط مناسب برای عملکردِ موردِ انتظارِ هسته می‌باشد.

رفتار بخش‌های مختلف مهاربند کمانش‌تاب به خصوص هسته‌ی فولادی آن، در طول عضو متفاوت می باشد. به طور کلی هسته‌ی فولادی از سه بخش تشکیل شده است:

- هسته‌ی فولادی تسلیم شونده و مهار شده
- هسته‌ی فولادی تسلیم نشونده و مهار شده
- هسته‌ی فولادی تسلیم نشونده و مهار نشده

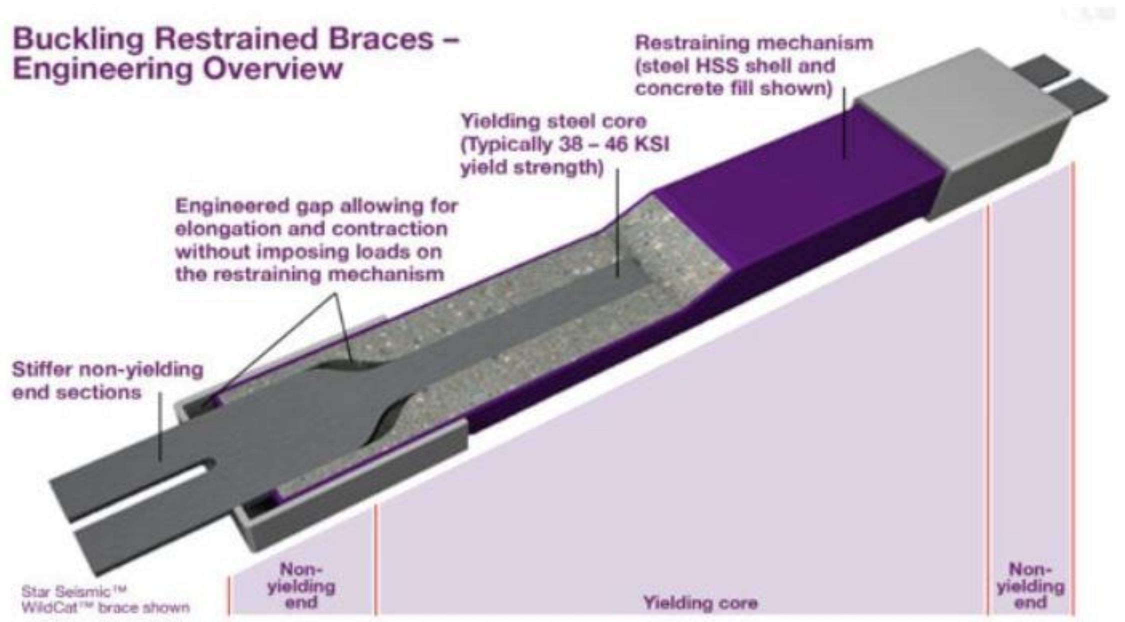
منظور از مهارشده (Restrained) این است که به کمک غلاف فولادی، از کمانش آن بخش جلوگیری می‌شود. در شکل (۲-۱۰) این نواحی مشاهده می‌شوند. شایان ذکر است که تامین شکل پذیری سیستم، توسط ناحیه مهارشده صورت می گیرد که به دلیل مهارشدگی در این ناحیه امکان کمانش وجود نخواهد داشت.

همچنین بخش‌هایی که ناحیه‌ی تسلیم نشونده نام دارند در قسمت‌های انتهایی عضو قرار می‌گیرند. در این بخش‌ها یا انتقال از هسته‌ی فولادی به ناحیه‌ی انتهایی انجام می‌شود (ناحیه‌ی انتقال) و یا ناحیه‌ی انتهایی عضو می‌باشد که محل اتصال مهاربند به ورق اتصال (گاست پلیت) است، در نتیجه طراحی این دو ناحیه به گونه‌ای خواهد بود که تسلیم در آن ها رخ ندهد.



شکل (۲-۱۰) نواحی مختلف یک مهاربند کمانش تاب

در ادامه و در شکل (۲-۱۱) هم یک نمونه سه‌بعدی از مهاربند کمانش‌ناپذیر مشاهده می‌شود که بخش‌های مختلف این مهاربند را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱۱) قسمت های مختلف یک مهاربند کمانش ناپذیر

۲-۵- اصول طراحی مهاربند کمانش ناپذیر

همانطور که در بخش‌های گذشته هم اشاره شد، مهاربندهای کمانش‌ناپذیر، عضو تسلیم شونده‌ی سازه خواهند بود که در زمان وقوع زلزله، متحمل تغییر شکل‌های غیر الاستیک زیادی می‌شوند اما در نقطه ی مقابل، سایر عضو های سازه رفتاری الاستیک خواهند داشت. برای طراحی سازه‌های متشکل ازمهاربند های کمانش‌تاب (BRBF) می‌توان از آیین‌نامه‌ی ASCE7 در کنار AISC341 استفاده نمود.

آیین‌نامه‌ی ASCE7 الزامات لرزه‌ای این سیستم را ارائه می‌نماید، این الزامات عبارتند از: سطح خطر لرزه‌ای، نامعینی مورد نیاز، محدودیت‌های روش‌های طراحی، نامنظمی‌ها و ویژگی‌های سیستم مانند R ,Ω0 , Cd و همچنین محدودیت‌های ارتفاعی. از طرفی آیین‌نامه‌ی AISC 341[۱] هم دستورالعمل‌هایی

[۱] American Institute of Steel Construction

در رابطه با طراحی و جزئیات هر عضو سازه‌ای، اتصالات مورد نیاز آن‌ها و همچنین الزاماتی برای رسیدن به شکل پذیری مورد نیاز در سیستم‌های متشکل از مهاربند کمانش‌تاب را ارائه می‌دهد.

مهاربندهای کمانش‌ناپذیر اصلی‌ترین المان سازه برای مقابله با زلزله هستند اما وظیفه اصلی این المان ها چیست؟

- مقاومت در مقابل نیروهای زلزله
- کنترل تغییر شکل های سازه

با رسیدن به این دو هدف، پایداری سازه در مقابل زلزله حفظ خواهد شد. همانطور که قبلا گفتیم سیستم BRBF در آیین نامه‌ی ASCE7 بزرگترین ضریب رفتار را، در میان تمام سیستم‌های سازه‌ای، به خود اختصاص داده است که نشان دهنده‌ی انتظار رفتار غیر الاستیک زیادی است که از این سیستم وجود دارد.

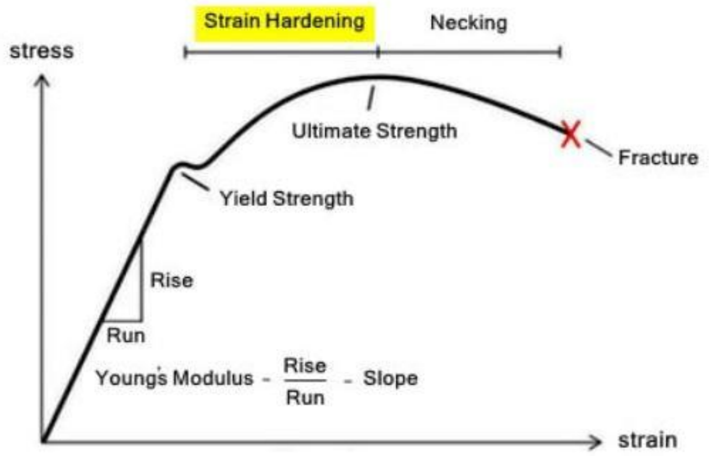
سه گام اصلی در طراحی یک سیستم BRBF عبارتند از:

ابعاد مورد نیاز BRB ها با توجه به ترکیب بارهای موجود در ASCE7 برای نیروی زلزله‌ای که به کمک ضریب رفتار ساختمان (ضریب R) کاهش یافته، تعیین می‌شود.

تغییرشکل‌های غیر الاستیک سازه در سطح طراحی و کرنش BRBها با موارد ذکر شده در ASCE7 و AISC341 کنترل شود که تطبیق داشته باشد. همانطور که می‌دانیم با تسلیم بخش‌هایی از مهاربند در زمان زلزله، کرنش این ناحیه افزایش می‌یابد که باعث افزایش تغییرشکل سازه می‌شود، مقدار مجاز کرنش و همچنین تغییرشکل سازه پس از تسلیم، توسط آیین نامه‌ها ارائه می‌شود.

پس از پیمودن این دو گام، مقاومت BRB ها با توجه به سخت شوندگی کرنشی (Strain Hardening) و اضافه مقاومت فشاری آن‌ها (Compressive Over Strength) تعیین شده و از آن برای طراحی تیرها، ستون‌ها و اتصالات آن‌ها استفاده می‌شود که این المان‌ها ضروریست تا انتهای بارگذاری الاستیک باقی بمانند. مفهوم سخت‌شوندگی کرنشی در مصالح مختلف با توجه به نمودار تنش-کرنش در شکل(۲-۱۲) مشخص می‌باشد، پس از تسلیم ماده، تا رسیدن به تنش نهایی، مقاومت عضو همچنان افزایش می یابد

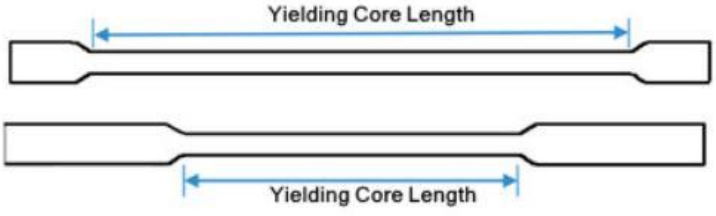
که به این پدیده سخت شوندگی کرنشی گفته می‌شود. به مقداری که مقاومت افزایش می یابد، اضافه مقاومت فشاری گفته می‌شود.



شکل (۲-۱۲) نمودار تنش-کرنش مصالح و مفهوم سخت شوندگی کرنشی

دو گام ابتدایی تقریبا مشابه با روند مورد استفاده در طراحی تمامی سیستم‌های شکل‌پذیر است اما استفاده از تغییر شکل طبقه، کرنش و نیروی سخت شوندگی مهاربند کمانش‌ناپذیر ویژگی مهم و منحصر به فرد طراحی BRBF می‌باشد.

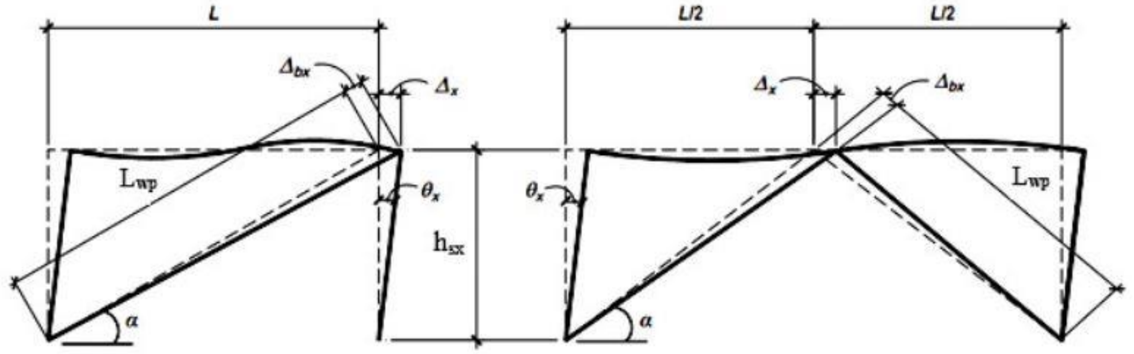
طول تسلیم شونده از آن جهت حائز اهمیت است که این بخش از مهاربند کمانش‌ناپذیر، وظیفه‌ی تامین بخش اعظمی از شکل پذیری سیستم را بر عهده دارد. در نتیجه در فرآیند طراحی، قابلیت استهلاک انرژی و تغییر شکل‌های غیر الاستیک مهاربند با توجه به این ناحیه تعیین می‌شود.



شکل (۲-۱۳) طول ناحیه‌ی تسلیم شونده در بادبند کمانش ناپذیر BRB

حال با فرض اینکه تیر صلب بوده و تغییرشکل در ناحیه‌ی الاستیک و تسلیم نشونده‌ی هسته‌ی BRB کوچک باشد، کرنش هسته ی BRB یا ε_{sc} برابر می‌شود با:

$$\varepsilon_{sc} = \frac{\theta_x \sin(2\alpha)}{2 \times YLR} \quad (1)$$



شکل (۲-۱۴) رفتار و تغییر شکل های دو نمونه از مهاربند کمانش ناپذیر پس از تغییرشکل[۴]

این رابطه‌ی ساده بسیار مفید خواهد بود؛ زیرا امکان تخمین سریعی از کرنش مورد نیاز هسته را فراهم می‌کند. با توجه به این رابطه، YLR و کرنش هسته رابطه‌ی معکوس دارند، به این معنا که برای نسبت طول تسلیم (YLR) های کوچکتر، کرنش های بزرگتری برای هسته در یک دریفت معمول نیاز است که چندان مطلوب نبوده و می‌تواند سبب گسیختگی BRB شود. به عنوان مثال با توجه به این رابطه، در صورتی که YLR=0.5 فرض شود و زاویه مهاربند با افق هم ۴۵ درجه باشد، کرنش هسته‌ی BRB برابر با زاویه‌ی دریفت طبقه θ می‌شود.

کرنش مورد نیاز برای هسته‌ی BRB (کرنش تقاضا) در پروسه ی طراحی (εsc) در موارد زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۱. به منظور علمکرد قابل قبول قاب BRBF،کرنش تقاضای هسته (کرنش مورد انتظارِ وارده) باید کمتر از ظرفیت کرنشی BRB باشد که این ظرفیت با توجه به آزمایش های BRB ها قبل از نصب در سازه تعیین می شود.

۲. کرنش تقاضای هسته برای محاسبه ی تنش معادل با کرنش سخت شوندگی هسته استفاده می شود، که از این تنش معادل همانطور که در گام سوم طراحی بیان کردیم برای بدست آمدن ظرفیت‌های مورد نیاز برای سایر اعضا (تیرها و ستون ها) استفاده می‌شود.

برای محاسبه‌ی هر دو مورد فوق نیاز به نتایج تست BRB می‌باشد که توسط سازنده در اختیار طراح قرار می‌گیرد.

به طور کلی، پیش از طراحی یک بادبند کمانش تاب، طراح با مراجعه به کاتالوگ‌های ارائه شده توسط شرکت‌های سازنده‌ی BRB، نمونه‌های مد نظرِ خود را از محصولاتِ شرکتِ مورد نظر انتخاب نموده و در ادامه‌ی فرآیند طراحی از مشخصات بدست آمده از کاتالوگ استفاده می‌نماید. لازم به ذکر است که معمولا مشخصات BRB ها قبل از نصب در سازه، توسط تست‌های آزمایشگاهی کنترل می‌شوند.

همانطور که در رابطه ۱ مشاهده می‌شود، دریفت طبقه، کرنش هسته‌ی BRB و همچنین YLR با یکدیگر رابطه دارند. علاوه بر اینها، مقاومت BRB هم از طریق کرنش سخت شوندگی با سه پارامتر یاد شده ارتباط دارد. با توجه به آیین نامه AISC341، مهاربند BRB باید به گونه ای طراحی و اجرا شود که بتواند تغییرشکل های مورد انتظار را تحمل نماید، که این تغییر شکل ها را می‌توان به کمک پارامتر کرنش هسته (ε_{sc}) هم بیان نمود. تغییر شکل مورد انتظار برابر است با حداکثر مقدار دو پارامترِ دریفت طبقه‌ای ۲درصد و یا دو برابر دریفت طراحی طبقه، به عبارت دیگر:

$$\{\text{Expected Deformation} = \max \{\text{Story Drift } 2\% , 2\times \text{Design Drift}\} \quad (۲)$$

از تغییرشکل مورد انتظار (یا کرنش هسته) برای تعیین β و ω با توجه به نمودار Back Bone حاصل از تست BRB استفاده می‌شود. در ادامه در رابطه با ضریب β و ω که به آنها ضرایب اصلاح (Adjustment Factors) گفته می‌شود، توضیح داده خواهد شد.

ضریب ω که به آن ضریب اصلاح فشار–کشش گفته می‌شود، بیانگر اضافه مقاومت در فشار می‌باشد (با توجه به مقاومت کششی). ضریب β یا ضریب اصلاح سخت شوندگی کرنشی هم نشان دهنده‌ی سخت

شوندگی کرنشی است. در ادامه و در نمودار زیر هم مشاهده می‌شود که این دو ضریب با نیروی مهاربند و مقاومت اسمی مصالح ارتباط دارند.

$$\beta = \frac{\beta \omega F_{YSC} A_{SC}}{\omega F_{YSC} A_{SC}} = \frac{P_{MAX}}{T_{MAX}}$$

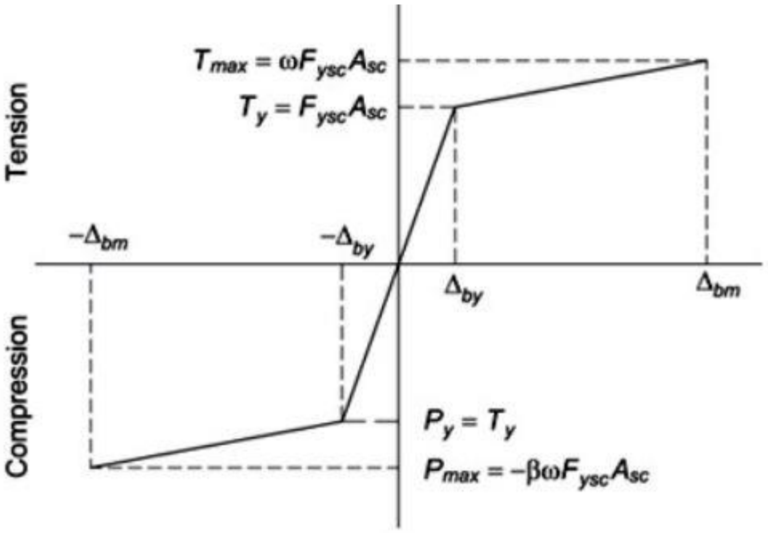
$$\omega = \frac{\omega F_{YSC} A_{SC}}{F_{YSC} A_{SC}} = \frac{T_{MAX}}{F_{YSC} A_{SC}} \qquad (۳)$$

Asc: مساحت سطح مقطع قسمت تسلیم شونده‌ی هسته‌ی فولادی

Fysc: تنش مقاومت تسلیم اندازه‌گیری شده‌ی هسته‌ی فولادی

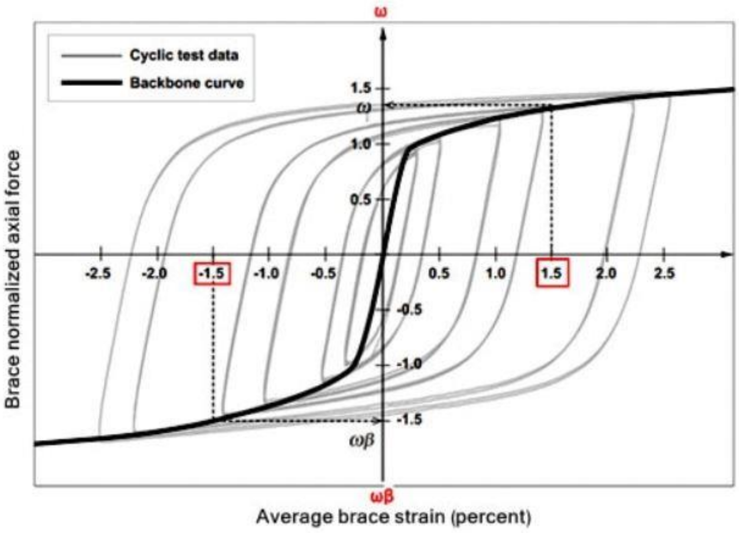
Pmax: نیروی فشاری حداکثر

Tmax: نیروی کششی حداکثر در محدوده‌ی تغییرشکل متناظر با دو برابر دریفت طراحی طبقه



شکل (۲-۱۵) نمودار نیرو – جابه جایی مهاربند[۶]

در شکل زیر یک نمونه تست چرخه‌ای مهاربند BRB به همراه نمودار BackBone آن آورده شده که این نمودار توسط سازنده BRB ارائه می‌شود. در این نمودار با استفاده از کرنش مورد نظر در دو حالت کششی و فشاری، هر دو پارامتر ω و β محاسبه می‌شوند.



شکل (۲-۱۶) نمونه ای از تست BRB تحت آزمایش بارهای چرخه ای[۴]

در کرنش (تغییرشکل) مورد انتظار، ضریب اصلاح کرنش سخت‌شوندگی یا ω برابر است با نسبت نیروی کششی حداکثر به نیروی تسلیم کششی اندازه‌گیری شده برای مهاربند. به همین صورت، در کرنش مورد انتظار، ضریب اصلاح مقاومت فشاری یا β برابر است با، نسبت حداکثر نیروی فشاری به حداکثر نیروی کششی.

به بیان دیگر، همانطور که در شکل بالا هم مشاهده می‌شود حاصل ضرب ωβ برابر است با نسبت حداکثر نیروی فشاری به نیروی تسلیم کششی اندازه‌گیری شده. تعاریف پارامترهای ذکر شده، در ادامه هم مشاهده می‌شوند:

$$\omega = \frac{\text{MaximumTensionForce}}{\text{MeasuredTensileYeiledForce(TEST)}}$$

$$\beta = \frac{\text{MaximumCompressionForce}}{\text{MaximumTensionForce}} \qquad (۴)$$

$$\omega\beta = \frac{\text{MaximumCompressionForce}}{\text{MeasuredTensileYeiledForce(TEST)}}$$

ضرایب اصلاحی در طراحی ظرفیتی اعضای قاب BRBF مانند تیرها، ستون‌ها و اتصالات مورد استفاده قرار می‌گیرند تا این اعضا، الاستیک باقی مانده و رفتار غیرالاستیک سیستم محدود به مهاربندهای

BRB شود. ضرایب اصلاحی BRBها با توجه به سازنده‌ی مهاربند، YLR و سایر جزئیات مربوط به جزئیات متغیر می‌باشند، اما این دو پارامتر معمولا در بازه‌های زیر قرار دارند:

$1.3 \le \omega \le 1.5$

$1.05 \le \beta \le 1.15$

۲-۶- روش های طراحی مهاربند کمانش تاب

با توجه به جدول ۶٫۱۲-۱ از آیین‌نامه‌ی ASCE7 جدول (۲-۱) سه روش اصلی طراحی برای سازه‌ها وجود دارد. این سه روش عبارتند از:

- روش بارجانبی معادل (ELF)[۱]
- روش تحلیل طیفی (MRSA)
- روش تحلیل تاریخچه زمانی

روش تحلیل مورد ۱ و ۲ معمولترین روش‌های تحلیل سازه های متشکل از باد بند کمانش ناپذیر می باشند.

[۱] Equivalent lateral load

جدول (۲-۱) روشهای مجاز تحلیل و طراحی مهاربندهای کمانش تاب[۳]

Seismic Design Category	Structural Characteristics	Equivalent Lateral Force Procedure, Section 12.8[a]	Modal Response Spectrum Analysis, Section 12.9.1, or Linear Response History Analysis, Section 12.9.2[a]	Nonlinear Response History Procedures, Chapter 16[a]
B, C	All structures	P	P	P
D, E, F	Risk Category I or II buildings not exceeding two stories above the base	P	P	P
	Structures of light-frame construction	P	P	P
	Structures with no structural irregularities and not exceeding 160 ft (48.8 m) in structural height	P	P	P
	Structures exceeding 160 ft (48.8 m) in structural height with no structural irregularities and with $T < 3.5T_s$	P	P	P
	Structures not exceeding 160 ft (48.8 m) in structural height and having only horizontal irregularities of Type 2, 3, 4, or 5 in Table 12.3-1 or vertical irregularities of Type 4, 5a, or 5b in Table 12.3-2	P	P	P
	All other structures	NP	P	P

[a]P: Permitted; NP: Not Permitted; $T_s = S_{D1}/S_{DS}$.

روش بار جانبی (روش تحلیل استاتیکی معادل) یا تحلیل طیفی هر دو روش‌هایی الاستیک محسوب می‌شوند و براساس نیروی زلزله‌ای هستند که به کمک ضریب رفتار R کاهش یافته است. برای محاسبه ی جابه‌جایی طراحی قاب‌های BRBF، نتایج حاصل از تحلیل الاستیک باید در ضریبی با نام ضریب بزرگنمایی جابه‌جایی یا Cd ضرب شوند.

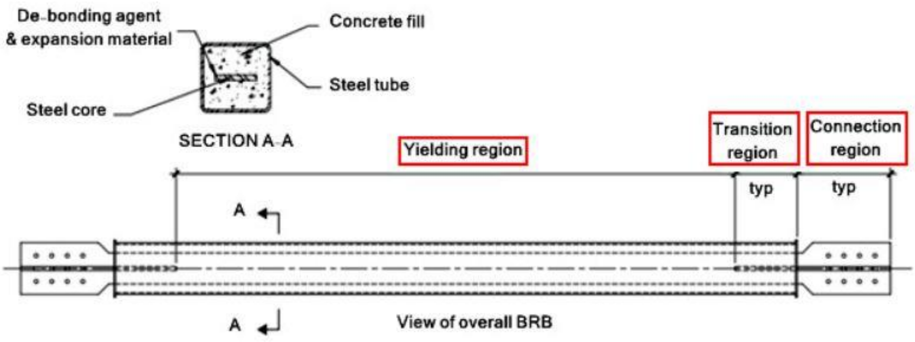
علیرغم اینکه روش بارجانبی ساده ترین روش تحلیل می‌باشد اما آیین‌نامه ها معمولاً محدودیت‌هایی را برای استفاده از این روش قائل می‌شوند اما استفاده از روش تحلیل طیفی محدودیتی نداشته و در تمام سازه‌ها قابل استفاده است. امروزه با افزایش قابلیت نرم‌افزارها، تحلیل به روش طیفی ساده‌تر شده است. برای سازه‌های مهاربندی شده با مهاربند کمانش ناپذیر (BRBF)، معمولاً استفاده از روش تحلیل طیفی به خصوص در سازه های بلند، در مقایسه با روش بارجانبی سبب طراحی اقتصادی‌تر قاب‌ها می‌شود. مشابه با قاب‌های مهاربندی همگرا، اتصالات تیر به ستون در قاب‌های BRBF هم به صورت مفصلی خواهد بود.

یکی از موارد مهم در آنالیز قاب‌های BRBF، مدل سازی سختی الاستیک مهاربندهای BRB می‌باشد. منظور از سختی الاستیک دقیقا مفهومی مشابه با سختی سایر اعضای سازه‌ای می‌باشد که از تقسیم نیرو به جابه جایی برای یک عضو سازه بدست می‌آید و عبارت است از: میزان نیروی لازم برای ایجاد

تغییرمکان واحد در یک المان. از آنجایی که بادبند کمانش تاب در طول خود از بخش‌های مختلفی تشکیل شده، محاسبه‌ی این سختی برای مهاربندهای کمانش تاب، نیاز به دقت بیشتری دارد.

همانطور که در بخش‌های ابتدایی ذکر شد و در شکل زیر هم مشاهده می‌شود، بادبند کمانش ناپذیر المانی غیر منشوری است که از سه بخش مجزا تشکیل شده است. برای محاسبه‌ی سختی واقعی مهاربند، لازم است هر بخش با دقت مدنظر قرار گیرند. این سه بخش عبارتند از:

- هسته‌ی تسلیم شونده (ناحیه‌ی مهارشده و تسلیم شونده)
- ناحیه‌ی انتقال (ناحیه‌ی مهارشده و تسلیم نشونده)
- ناحیه‌ی اتصال (ناحیه ی مهارنشده و تسلیم نشونده)



شکل (۲-۱۷) سه ناحیه‌ی اصلی تشکیل‌دهنده‌ی مهاربند کمانش ناپذیر BRB [۴]

شکل (۲-۱۸) سه ناحیه‌ی اصلی در یک بادبند کمانش تاب BRB واقعی

در فرآیند آنالیز نیاز به استفاده از سختی واقعی BRB داریم. سختی واقعی معمولاً به کمک ضریب اصلاح سختی (KF) و سطح مقطع هسته (Asc) بدست می‌آید و مقدار این سختی برابر با ضرب این دو می‌باشد.

با استفاده از ضریب KF، سختی المان مهاربند غیرمنشوری، با سختی یک المان منشوری معادل سازی می‌شود. با این توضیحات نتیجه می‌شود که مدلسازی مهاربند کمانش تاب معمولاً به صورت یک مقطع منشوری (مانند تمامی مهاربندهای معمول) انجام می‌شود. تعدادی از پارامترهای تاثیرگذار در تعیین ضریب KF عبارتند از:

- مقدار نسبت طول تسلیم (YLR)
- هندسه‌ی مهاربند BRB
- جزئیات اتصالات
- کارخانه‌ی سازنده‌ی مهاربند BRB

باتوجه به توضیحات فوق می توان گفت مهاربندهای BRB مختلف، ضرایب اصلاح سختی (KF) مختلفی دارند و حتی ممکن است در یک ساختمان، ضریب KF مهاربندها، با یکدیگر متفاوت باشد. این ضریب معمولا در بازه‌ی ۱٫۳ تا ۱٫۷ قرار دارد. در نتیجه طراح باید با کارخانه‌ی سازنده‌ی BRB تعامل کامل داشته باشد تا بتواند به کمک روش هایی که سازنده ارائه می‌کند، ضریب KF مناسب برای هر حالت را تعیین نماید. لازم به ذکر است، به عنوان یک راه حل جایگزین، در صورتی که مهاربند از ابتدا به صورت یک مقطع منشوری مدلسازی شود، میتوان سختی الاستیک BRB را مستقیماً محاسبه نمود.

۲-۷- روند طراحی مهاربند کمانش تاب به صورت گام به گام

طراحی قاب‌های BRBF مشابه با طراحی سایر سیستم‌ها با شکل پذیری بالا با عضو تسلیم شونده (فیوز) می‌باشد. در حالت کلی در این سازه‌ها گام‌های طراحی به صورت ساده شده شامل سه بخش زیر می باشند:

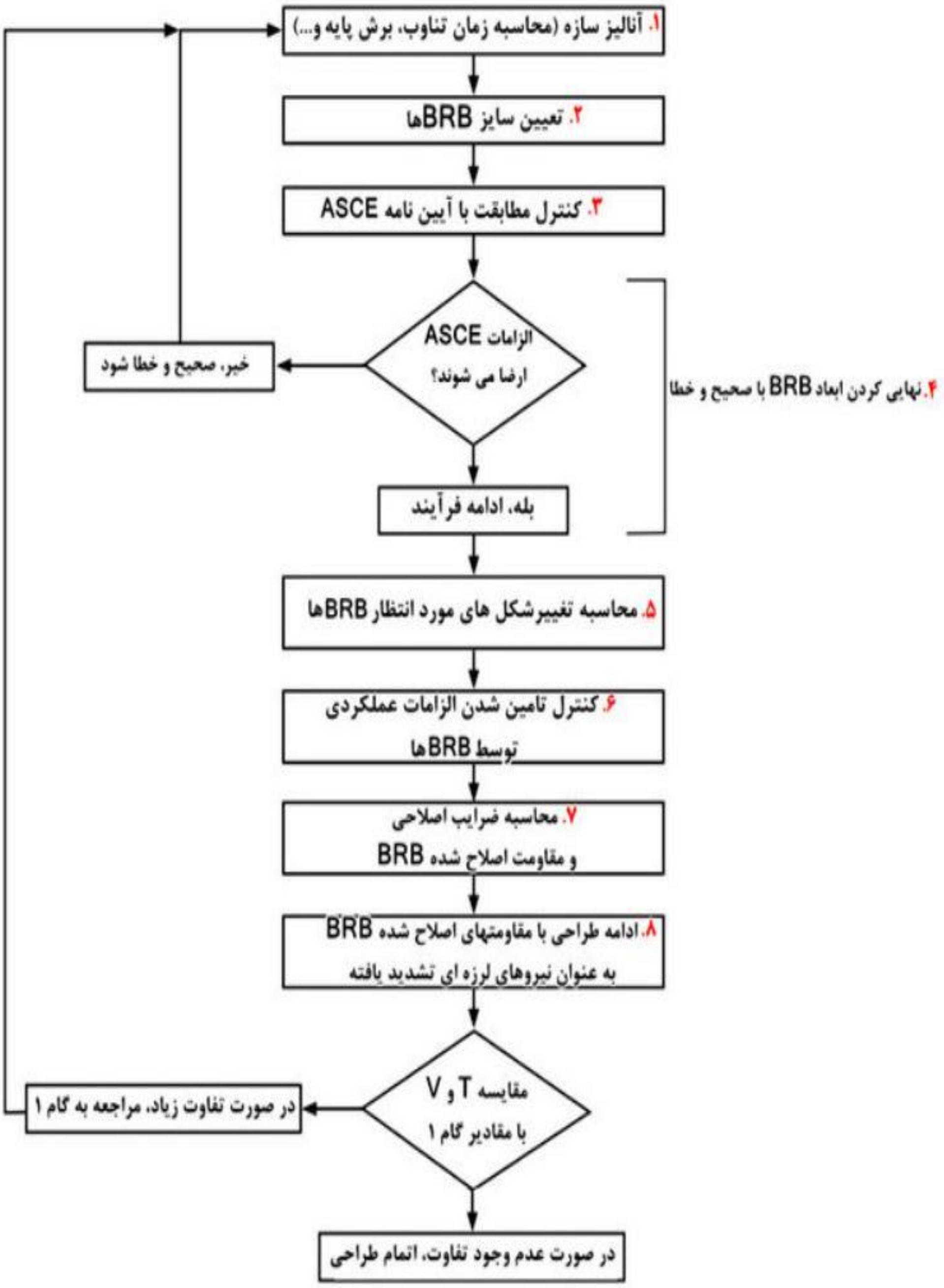
۱. طراحی المان شکل پذیر و تسلیم شونده (فیوز) برای نیروی زلزله‌ی کاهش یافته (به کمک ضریب R).

۲. کنترل تغییر شکل‌های غیرالاستیک عضو تسلیم شونده و مقایسه‌ی آن با مقادیر مجاز.

۳. طراحی سایر بخش های سازه، با توجه به ظرفیت قابل انتظار عضو شکل پذیر (فیوز).

۴. حال برای سازه های متشکل از مهاربندهای BRB می‌توان سه گام بالا را به صورت زیر بیان نمود:

- BRBها با توجه به نیروهایی که به کمک ضریب R کاهش یافته‌اند طراحی می‌شوند.
- تغییرشکل های غیر الاستیک هسته‌ی تسلیم شونده کنترل می‌شوند تا در محدوده‌ی مجاز باشند.
- با استفاده از روند طراحی مقاومتی، اتصالات، تیرها و ستون ها با توجه به مقاومت BRB ها طراحی می‌شوند (منظور از مقاومت، مقاومت تسلیم BRB می‌باشد تا به این روش، سایر المان های سازه‌ای از تسلیم شدن در امان بمانند). روند طراحی قاب های BRBF در فلوچارت زیر مشاهده می‌شود.



شکل (۲–۱۹) روند طراحی قاب های BRBF [۴]

در ادامه به توضیح هر یک از گام‌های طراحی پرداخته شده است:

آنالیز سازه: در این بخش مدلسازی سازه، با توجه به توضیحات بخش قبل انجام می‌شود. برای مدلسازی مناسب BRB ها، لازم است که یک مقدار اولیه برای ضریب KF با توجه به داده‌های سازنده و یا سایر

مراجع مرتبط، انتخاب شود. همچنین مقدار ω و β هم، با توجه به توضیحات بخش های گذشته برای تعیین اولیه‌ی ابعاد تیرها و ستون‌های قاب BRBF، محاسبه می‌شود. این سه پارامتر، یعنی KF، β و ω، در گام‌های بعدی صحت سنجی خواهند شد، در نتیجه در این گام، تخمین یک مقادیر نسبتا دقیق هم برای آنها، مناسب است.

تعیین سایز BRB ها: با توجه به مقاومت لازم حاصل از مدل آنالیز شده، سایز BRB ها طوری تعیین می‌شود که مقاومت طراحی آنها از مقاومت لازمشان بزرگتر باشد. عموما هم از نظر اقتصادی و هم از نظر عملکردی بهتر است که سایز BRB ها بیشتر از حد مورد نیاز انتخاب نشود. تعداد سایز هایی که برای BRB ها در یک پروژه انتخاب می‌شود، ترکیبی از نسبت تقاضا به ظرفیت بهینه و همچنین اقتصاد پروژه می باشد که بستگی به قضاوت و تجربه‌ی طراح دارند. لازم به ذکر است که معمولا در پروژه ها تمایل به عدم استفاده از BRB با مقاطع متنوع بوده و عموما تعداد مقاطع متفاوت در یک پروژه‌ی معمول، از ۴ الی ۵ مورد بیشتر نمی‌شود، زیرا افزایش تنوع مقاطع فرآیند ساخت و خرید را پیچیده کرده و سبب غیر اقتصادی شدن پروژه می‌شود.

در این مرحله، جزییات اولیه‌ی اتصالات BRB مانند نوع آن و سایزشان باید تعیین شود زیرا این پارامترها در تعیین ضرایب اصلاح سختی و مقاومتی تاثیر گذارند.

کنترل مطابقت با آیین‌نامه‌ی ASCE7: بعد از تعیین سایز BRB ها ضوابطی مانند نسبت دریفت طبقات، پایداری سازه و نامنظمی‌ها کنترل می‌شوند. برای ارضا این ضوابط ممکن است احتیاج به چندین مرتبه صحیح و خطا در سایز BRB ها، یا اصلاح قاب ها وجود داشته باشد. برای دو سازه با هندسه‌ی کاملا مشابه، سیستم مهاربندی با بادبند کمانش ناپذیر در مقایسه با سیستم مهاربند همگرای ویژه، سختی جانبی کمتری خواهد داشت. در نتیجه در فرآیند طراحی ممکن است الزامات مربوط به جابه جایی (مانند دریفت نسبی طبقات) نقش مهمتری در طراحی داشته باشند.

صحیح و خطا جهت نهایی شدن ابعاد BRB: صحیح و خطا بین گام‌های ۲ و ۳ تا جایی که احتیاجی به تغییر سایز BRB نباشد، ادامه می‌یابد. در این مرحله هماهنگی کامل با سازنده‌ی مهاربندهای کمانش

ناپذیر اجتناب ناپذیر می‌باشد تا مقادیری که تا به اینجا برای KF، ω و β انتخاب شده اند صحت‌سنجی شوند. با نهایی شدن ابعاد مهاربندها، بخش مقاومتی BRB ها کامل می‌شود.

محاسبه‌ی تغییرشکل های مورد انتظار BRBها: در بخش‌های گذشته روشی معرفی شد که به کمک پارامتر هایی مانند YLR تغییرشکل مورد انتظار BRB محاسبه می‌شود. تغییر شکل مورد انتظار مهاربند مقادیری هستند که به کمک حداکثر مقادیر زیر بدست می‌آیند:

دریفت طبقه معادل ۲ درصد

دو برابر دریفت طراحی طبقه

کنترل تامین شدن الزامات عملکردی توسط BRB ها: در این مرحله طراح اطلاعات لازم برای تعریف دو پارامتر مورد نیاز از BRBها را دارد این پارامترها عبارتند از: سایز BRBها و تغییرشکل BRBها. در نتیجه می‌توان یک BRB با اتصال انتهایی مشخص را از میان مدل‌های پیشنهادی سازنده انتخاب نمود. BRB انتخابی، باید تحت تست قرار گیرد تا مشخص شود که توانایی تامین تغییرشکل مورد انتظار در پروژه را دارد (BRB تست شده دقیقا باید ابعادی مشابه با المان مورد استفاده در پروژه داشته باشد).

محاسبه‌ی ضرایب اصلاحی و مقاومت‌های اصلاحی BRB: پس از آنکه یک BRB با مشخصات اتصال انتهایی مشخص، انتخاب شد، ضریب اصلاح سخت‌شوندگی کرنشی و ضریب اصلاح مقاومت فشاری، به کمک Backbone Curve ارائه شده توسط سازنده، تعیین می‌شوند. از این ضرایب برای محاسبه‌ی مقاومت اصلاح شده‌ی BRB استفاده خواهد شد.

ادامه ی طراحی با مقاومت‌های اصلاح شده‌ی BRB به عنوان نیروهای لرزه‌ای تشدید یافته: مقاومت‌های اصلاح شده‌ی مهاربند در کشش و فشار که در گام قبل محاسبه شدند، در ادامه به عنوان بارهای لرزه‌ای تشدید یافته در ترکیبات بارگذاری مورد استفاده قرار خواهند گرفت. این مقادیر برای طراحی سایر المان های قاب مانند تیرها، ستون ها، اتصالات مهاربندها و پی‌ها استفاده می‌شوند. از آنجایی که مقاومت فشاری اصلاح شده‌ی مهاربند، β برابر مقاومت کششی اصلاح شده‌ی مهاربند است، در نتیجه

دو مجموعه‌ی مقاومت اصلاحی متفاوت به المان‌های قاب BRBF، با توجه به نحوه‌ی قرارگیری BRB و همچنین جهت بار، اعمال می‌شود.

۲-۸- مزایا و معایب قابهای مهاربندی مقاوم در برابر کمانش و موارد کاربرد آنها

در مقایسه با سایر سیستم های باربر جانبی از جمله قابهای خمشی یا قابهای مهاربندی شده معمولی، مهاربندهای کمانش تاب دارای مزایای پر تعداد و معایبی چند می باشند. برخی از مزایای این سیستم عبارتند از:

۱. در مقایسه با قابهای خمشی، دارای سختی الاستیک بالایی در تحریک لرزه ای می باشند که این امر سبب ارضاء آسان تر ضوابط آئین نامه ای در ارتباط با محدودیت تغییر مکان جانبی و گریز نسبی طبقات می شود.

۲. برخلاف مهاربندی همگرا دارای مکانیزم تسلیم تحت کشش و فشار می باشند و دچار کمانش تحت بارهای فشاری نمی شود که این امر استهلاک انرژی پایدار و نسبتاً زیادی را در تحریک لرزه ای توسط این اعضا امکان پذیر می سازد.

۳. دیرتر وارد محدوده رفتار خمیری شده و در رفتار الاستیک سختی جانبی ،EBF در مقایسه بامهاربندهای بیشتری از خود نشان می دهند. بنابراین برای کاهش تغییر مکان های جانبی تا حدود قابل قبول آیین نامه بهتر عمل می کند.

۴. نصب آنها به خاطر اجرای اتصالات پینی یا پینی یا پیچ و مهره ای به ورق های اتصال باعث کاهش هزینه های اقتصادی زمان نصب و اجرا شده و از نظارت و کارهای جوشکاری در محل می کاهد.

۵. در زلزله‌های بزرگ به صورت فیووز سازه ای قابل تعویض عمل می کنند، که خرابی سایر المانها را کاهش داده و امکان جایگزینی مهاربندهای معیوب را بعد از زلزله فراهم می کند.

۶. امکانات طراحی انعطاف پذیری را ارائه می کنند چون هم سختی و هم مقاومت مهاربند به آسانی با یکدیگر سازگار می شود. از طرف دیگر مدلسازی رفتار تناوبی مهاربندهای کمانش تاب برای آنالیزغیرخطی آسان است.

۷. برای بهسازی لرزه ای، مزیت بیشتری نسبت به سیستم های مهاربندی رایج دارند زیرا ضوابط طراحی ظرفیت برای سیستم برابر جانبی معمولی ممکن است نیاز به هزینه بالایی در تقویت های مورد نیازفونداسیون و مقاوم سازی دیافراگم کف داشته باشد.

از طرفی قاب های مهاربندی کمانش تاب دارای معایبی نیز می باشند:

۱. اکثر مهاربندهای کمانش تاب دارای امتیاز تجاری و انحصاری می باشند و در دسترس عموم قرار ندارند.

۲. تنوع مشخصات فولاد به خصوص در مناطقی که فولادهای با خواص مختلف بدون کنترل عرضه می شود می تواند در رفتار قابهای مهاربندی کمانش تاب تاثیر نامطلوب بگذارد.

۳. ممکن است تحت زلزله های بزرگ تغییر شکلهای دائمی در سازه اتفاق بیفتد، زیرا این سیستم ها همانند بسیاری از سیستم های جاری شونده فلزی مکانیزم بازگشتی ندارند.

۴. در ایران ضوابط طراحی این اعضا هنوز وارد آیین نامه های طراحی نشده است و کاربرد آنها نیاز به کسب مجوز از مقامات ذیصلاح و انجام آزمایش یا کسب نظر کمیته های فنی دارد.

۵. معیارهای شناسایی خرابی و جایگزینی مهاربندهای معیوب، نیاز به تدوین دارد و دستورالعمل خاصی در این زمینه موجود نمی باشد.

موارد کاربرد:

مهاربندهای کمانش تاب را می توان در سازه های فولادی یا بتن مسلح جدید و یا در سازه های پلهای فولادی تیری یا خرپایی نصب کرد. همچنین می توان به طور موثری در ارتقاء لرزه ای سازه های موجود که دارای عملکرد لرزه ای ناکافی می باشند و برای حفاظت از آنها در زلزله های بزرگ و برای بدست آوردن تراز بالای عملکرد از آنها استفاده نمود.

به طور خلاصه مهاربندهای کمانش تاب را می توان با اهداف زیر در سازه های ساختمانی به کار برد:

- کاهش پاسخ سازه ای تحت عملکرد لرزه ای
- کاهش جابجایی طبقات میانی
- کاهش تخریب المانهای سازه ای به علت میرا کردن انرژی

۲-۹- مراحل بارگذاری و معیارهای پذیرش

بارها می بایست به منظور ایجاد تغییر شکل های زیر به نمونه اعمال شوند. که در آن تغییر شکل مذکور، در آزمایش نمونه ی محوری، به عنوان تغییر شکل محوری هسته ی فولادی و در آزمایش نمونه تحت مجموعه، نیاز تغییر شکل دورانی برای مجموعه ی آزمایش می باشد.

۱) دو چرخه ی بارگذاری در تغییر شکل مربوط به $\Delta_b = \Delta_{by}$

۲) دو چرخه ی بارگذاری در تغییر شکل مربوط به $\Delta_b = 0.5\Delta_{bm}$

۳) دو چرخه ی بارگذاری در تغییر شکل مربوط به $\Delta_b = \Delta_{bm}$

۴) دو چرخه ی بارگذاری در تغییر شکل مربوط به $\Delta_b = 1.5\Delta_{bm}$

۵) دو چرخه ی بارگذاری در تغییر شکل مربوط به $\Delta_b = 2\Delta_{bm}$

۶) چرخه های اضافی بارگذاری در تغییر شکل های متناظربا $\Delta_b = 1.5\Delta_{bm}$ تا رسیدن به تغییر شکل محوری غیر الاستیک تجمعی حداقل ۲۰۰ برابر تغییر شکل تسلیم.

که در آن Δ_b تغییر شکل مورد استفاده به منظور بارگذاری نمونه ی مورد آزمایش است. Δ_{bm} که نیز مقدار و متناظر با دریفت طرح در طبقه می باشد. همچنین Δ_{by} مقدار Δ_b در حد تسلیم نمونه است.
آیین نامه الزام می دارد که جابجایی نسبی طبقه در طراحی نباید کمتر از ۱٪ برابر ارتفاع طبقه به منظور محاسبه ی Δ_{bm} در نظر گرفته شود.

معیارهای پذیرش:

تمام آزمایش ها باید ضوابط زیر را برآورده سازند:

- منحنی بار-تاریخچه ی جابجایی باید نشانگر رفتار پایدار و قابل تکرار به همراه سختی مثبت افزاینده باشد.
- هیچ نوع شکست، ناپایداری مهاربند یا خرابی اتصال انتهایی مهاربند نباید مشاهده شود.
- در چرخه های با تغییر شکل بزرگتر از Δ_{by} ، نسبت نیروی فشاری حداکثر به نیروی کششی حداکثر نباید بزرگتر از ۱,۳ باشد.
- در چرخه های با تغییر شکل بزرگتر از Δ_{by} ، حداکثر نیروی کششی و فشاری نباید کمتر از مقاومت اسمی هسته باشد.

۲-۱۰- پیشرفت های اخیر در زمینه BRBs

محققین زیادی در سال های اخیر تلاش نموده اند با تغییر ساختار و جزئیات BRB ، بعضی از ضعف های موجود در آن را برطرف کنند. عمده ی کارهای انجام گرفته در این راستا، بر روی امکان حذف مصالح پرکننده و همچنین امکان کوتاه تر کردن طول تسلیم شونده در مهاربند است.

۲-۱۰-۱- مطالعه اریاشار[۱] و همکاران در ترکیه

در سال ۲۰۰۹، ۱۲ تست روی مهاربند مقید در برابر کمانش با غلاف فولادی توسط اریاشار و توپکایا [7] انجام گرفت. در این آزمایش ها مواردی مثل جوشی یا پیچی بودن اتصال در اجزای غلاف، اثرات

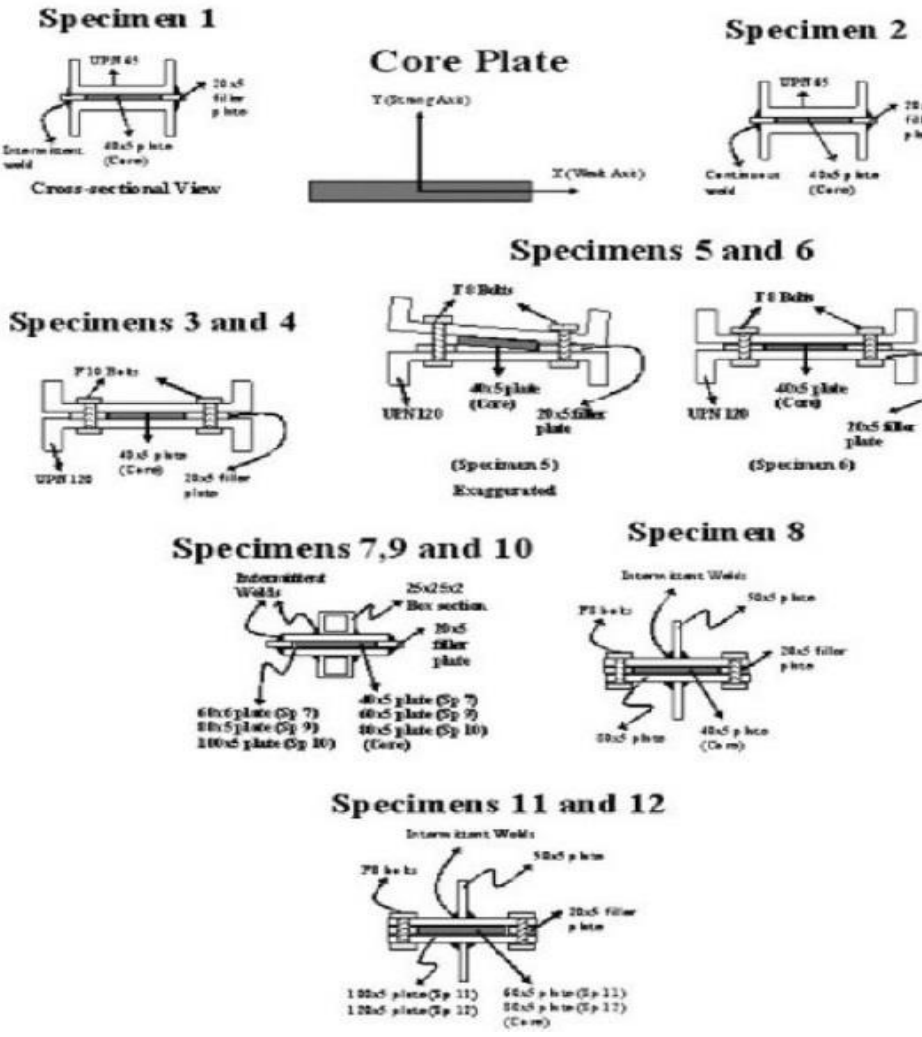
[۱] Eryaşar, Mehmet Emrah

پیش تنیدگی پیچ ها، جزئیات اتصال هسته به غلاف، نسبت ابعادی عرض به ضخامت در هسته و اثرات نقص ساخت در عملکرد مهاربند مورد بررسی قرار گرفت.

در مطالعه انجام گرفته توسط ایاشار و توپکایا همچنین اثرات استفاده از مصالح جداکننده که پیشنهاد ترمبلی در سال ۲۰۰۶ بود، مورد بررسی قرار گرفت، دو سری آزمایش در دانشگاه فنی و مهندسی خاورمیانه در ترکیه انجام گرفت. در یک سری تست ها اثرات متقابل هسته و غلاف مورد بررسی قرار گرفت. در سری دوم تست ها تلاش شد تا مکانیزم های مقید کننده ی کمانش با عملکرد مطلوب در تست های سری اول بهینه شده و عملکرد هسته با مقادیر مختلف نسبت ابعاد بررسی گردد.

نمونه های مورد مطالعه

شش نمونه ی اول مربوط به آزمایش های سری اول و بقیه مربوط به آزمایش های سری دوم می باشند طول تسلیم شونده در نمونه ها برابر ۹۰۰ میلی متر است در حالی که طول کلی مهاربند ۱۱۴۰ میلی متر است و در نواحی انتهایی نمونه ها قسمتی صلیبی شکل وجود دارد که تسلیم نمی شود. در تمامی نمونه ها هسته تسلیم شونده مستطیلی شکل است (شکل۲-۲۰)، با ضخامت ثابت ۵ میلی متر و عرض های متفاوت ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی متر، چهار پیچ پر مقاومت با قطر ۲۰ میلی متر از رده ۸/۸ استاندارد اروپایی برای اتصال نمونه ها به دستگاه محرک مورد استفاده قرار گرفت تا گیرداری کامل در برابر دوران را فراهم کند.



شکل (۲-۲۰) مقاطع مورد استفاده ارياشار و توپکايا در تست ها[۷]

در تست های سری اول سعی شد تا جزئیات بندی مناسب برای اندرکنش غلاف - هسته ارائه گردد تا مشکلات مربوط به مهاربند های مقید در برابر کمانش تمام فولادی حذف گردد. مشکل اصلی این گونه مهاربندها کمانش های موضعی و کرنش های غیریکنواخت در هسته، تحت مقادیر بزرگ کرنشی می باشد. در این تحقیق، هسته بین اعضای غلاف فولادی به گونه ای قرار گرفت (نظیر آنچه در شکل ۲۱ دیده می شود) که از کمانش های موضعی حول محور ضعیف کمانشی (محور X) جلوگیری به عمل آید. در تست های سری اول از مقاطع UPN به عنوان غلاف استفاده شد. در دو نمونه اول مقاطع UPN با استفاده از اتصال جوشی و در چهار نمونه ی بعدی با استفاده از اتصال پیچی به یکدیگر متصل شدند.

وزن غلاف فولادی ساخته شده به ترتیب ۱۵ کیلوگرم و ۲۸ کیلوگرم به ترتیب برای مقاطع UPN65 و UPN120 استفاده شده در غلاف است.

در آزمایش های سری دوم تلاش شد تا هسته ها با نسبت های ابعادی متفاوت بررسی شود. همچنین مکانیزم مقید کننده بهینه شد تا سبک تر و ارزان تر شود. به منظور طراحی غلاف، معیار داده شده در رابطه ۲ مورد استفاده قرار گرفت، تحقیقات ایواتا نشان داد که شکل پذیری تجمعی نمونه ها با افزایش مقدار این نسبت افزایش می یابد، در آزمایش های سری دوم، مکانیزم مقید کننده در برابر کمانش متشکل از ورق های هادی بود که پروفیل باکس یا تسمه به آن جوش شده بود. در مقایسه با آزمایش های سری اول، این نمونه ها علی رغم داشتن بار تسلیم بالاتر، سیستم مقید کننده سبک تری داشتند.

جزئیات اندرکنش هسته - سیستم مقیدکننده:

در تست های سری اول، جزئیات بندی های مختلفی مورد آزمایش قرار گرفت تا مشکلات گزارش شده توسط محققین در رابطه با اثر متقابل هسته و غلاف حل شود. نگرانی اصلی در این زمینه تشکیل کمانش های موضعی در هسته در اثر اصطکاک بین هسته و غلاف بود که منجر به کرنش های غیر یکنواخت در هسته میشد. اثر پواسن نیز در طراحی عضو BRB می بایست مورد توجه قرار گیرد، از این رو در آزمایش های انجام شده توسط اثر ترمبلی و همکاران، محققین فاصله خالی بین هسته و غلاف در دو جهت (در ضخامت و در عرض هسته) در نظر گرفتند، به علاوه هیچ مصالح جداکننده ای مورد استفاده قرار نگرفت.

در تحقیق ایریاشار و توپکایا، شیوهای متفاوت به کار گرفته شد. فضای خالی فقط در عرض هسته مورد استفاده قرار گرفت و در ضخامت، هسته با غلاف در تماس بود. به منظور جلوگیری از کمانش حول محور قوی (محور y)، ورق های پرکننده ای در دو قسمت هسته قرار گرفتند (شکل ۲۱). این ورق ها به صورت سرتاسری و در فاصله برابر با یک میلی متر از هسته تعبیه شدند. این فضای خالی اجازه انبساط هسته در عرض را فراهم می کرد. وقتی هسته تسلیم می گردد، حول محور قوی (محور y) کمانش می کند که البته به علت فضای خالی کم بین هسته و ورق پرکننده تا حد زیادی این کمانش

محدود می شود. بنابراین ظرفیت باربری BRB چندان متأثر نمی شود. در تمامی نمونه ها طول تسلیم شونده ی ۹۰۰ میلی متری توسط چهار لایه پلی اتیلن هر یک به ضخامت ۰,۵ میلی متر دور پیچی شد. در حقیقت پلی اتیلن در اینجا به عنوان مصالح جداکننده عمل می کرد. در نمونه های پنج تا ۱۲، روی سطح خارجی پلی اتیلن زده گریس کاری شد تا نیروی اصطکاکی به حداقل برسد.

برای اتصال قطعات سیستم مقیدکننده، در نمونه های یک و دو به ترتیب از جوش قطعه ای و جوش پیوسته استفاده شد. همچنین در نمونه های سه و چهار اتصال پیچی با میزان پیش تنیدگی متفاوت مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از جوش قطعه ای در نمونه اول می توانست به کاهش اصطکاک بین هسته و مکانیزم مقید کننده کمک کند. در نمونه ی سوم پیچ ها با دستگاه و در نمونه ی چهارم اکثرا توسط دست بسته شدند. علی رغم اینکه تست ها در حالت قائم انجام گرفت، نیروی اصطکاک بین هسته و غلاف مانع از سر خوردن غلاف تحت اثر وزن خود می شد. در نمونه های پنجم و ششم اصطکاک به عنوان مانعی برای جلوگیری از سر خوردن مکانیزم مقید کننده مورد اعتماد قرار نگرفته و از اتصال مستقیم هسته به غلاف توسط خال جوش در وسط دهانه استفاده شد. بنابراین در این دو نمونه اتصال پیچی بسته شده با دست به کار گرفته شد، تفاوت اصلی بین نمونه های پنجم و ششم در این مطالعه وجود یک نقص ساخت اولیه در نمونه ی پنجم بود . به دلیل وجود این نقص ساخت هسته ی نمونه پنجم به طور کامل با سیستم مقید کننده ی آن در تماس نبود.

نمونه های سری دوم پس از انجام آزمایش های مربوط به نمونه های سری اول ساخته شدند. در حقیقت جزئیات بندی هایی که در آزمایش های سری اول عملکرد مناسبی از خود نشان داده بودند، انتخاب و در نمونه های سری دوم مورد استفاده قرار گرفتند. در تمامی نمونه ها از خال جوش استفاده شد، مشابه آن چه در نمونه ششم استفاده شده بود. نمونه های هفتم و هشتم مشابه نمونه های سری اول نسبت عرض به ضخامت هشت داشتند، تفاوت این نمونه ها با نمونه های سری اول استفاده از پروفیل های موجود در بازار به عنوان عضو مفید کننده بود. در نمونه هفتم از اتصال جوشی و در نمونه هشتم از اتصال پیچی استفاده شد. به منظور کاهش اثر اصطکاک در آزمایش های سری دوم، در نمونه های

پیچی، پیچ ها با دست بسته شدند و در نمونه هایی با اتصال جوشی از جوش های قطعه ای به جای جوش های پیوسته استفاده شد. نسبت عرض به ضخامت هسته در نمونه های نهم و دهم به ترتیب ۱۲ و ۱۶ بود. نمونه های ۱۱ و ۱۲ مشابه نمونه های نهم و دهم بودند با این تفاوت که از اتصال پیچی در سیستم مقید کننده استفاده می کردند.

- مجموعه آزمایش و پروتکل بارگذاری

مجموعه آزمایش شامل یک قاب بود که به طور خاص برای این مطالعه ساخته شد. بارهای کششی و فشاری توسط یک جک ۲۵۰ کیلونیوتنی به نمونه ها اعمال شد. تمامی نمونه ها تحت پروتکل بارگذاری شبه استاتیکی افزاینده قرار گرفتند.

به منظور آزمایش تایید صلاحیت BRB ها تست بارهای چرخه ای، پروتکل بارگذاری پیشنهاد شده آیین نامه ی ۲۰۰۵ AISC scistric provisions با اندکی تغییر در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است.

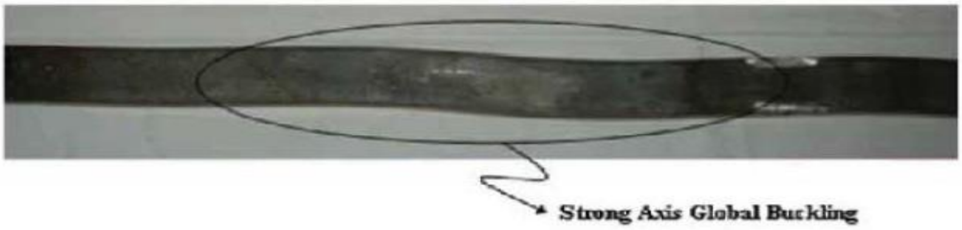
در پروتکل بارگذاری، تغییر مکان در سطح طراحی می بایست لحاظ گردد. تقاضای کرنشی BRB متأثر از عوامل مختلفی است، نظیر مشخصات هندسی و مصالح و ویژگی های طراحی لرزه ای سازه[7].

در تحقیق ارياشار و توپکایا، تقاضای کرنشی در سطح طراحی برابر یک درصد در نظر گرفته شد. در این الگوی بارگذاری نمونه ها تحت چرخه های بارگذاری درهشت سطح تغییر مکانی محوری متفاوت قرار گرفتند، که عبارت بودند از Δ_{by} ۰,۳۳ ، Δ_{by} ۰/۶۶ ، تغییر مکان تسلیم و تغییر مکان هایی متناظر با Δ_{bm} ۰,۳۳، Δ_{bm} ۰,۵، Δ_{bm} ۱,۵ ، Δ_{bm} ۲ . در هر سطح تغییر مکانی دو سیکل بارگذاری اعمال شد، تغییر شکل های پلاستیک تجمعی در این الگوی بارگذاری از ۲۰۰ بیشتر بود که ضابطه ی آیین نامه ی ۲۰۰۵ AISC seismic provisions را برآورده می کند. هدف از دو سیکل اولیه که در این الگوی بارگذاری به چشم می خورد و در AISC وجود ندارد، این بود که در صورت عملکرد نامناسب نمونه مورد آزمایش در این سیکل های با حد کرنشی پایین، آزمایش همان ابتدا متوقف شود. در نمونه

های ۱۱ و ۱۲ سیکل های اضافی در حد کرنشی دو درصد، پس از اتمام پروتکل بارگذاری اصلی اعمال شد. هدف از اعمال این سیکل ها تعیین حداکثر تغییر شکل غیر الاستیک تجمعی قابل گسترش در این نمونه ها بود.

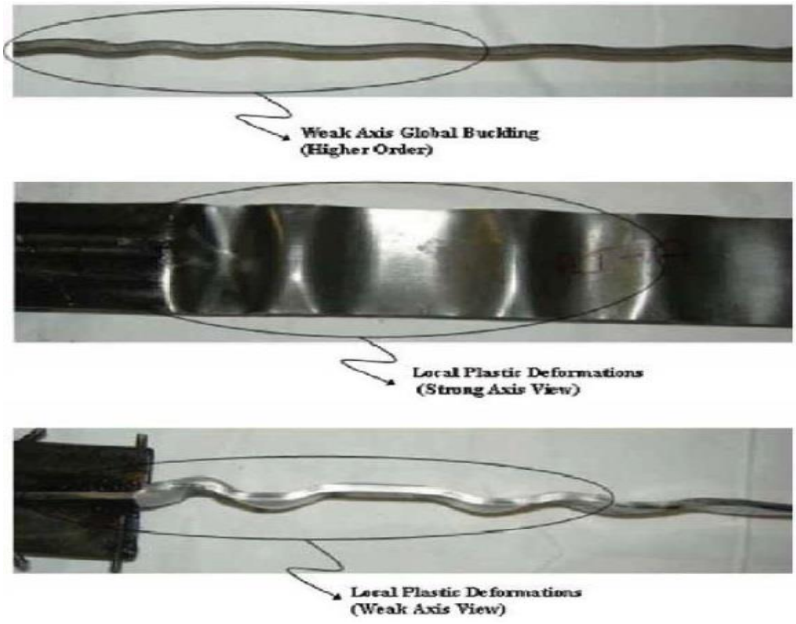
نتایج آزمایش ها:

پاسخ کلی نمونه ها به صورت نمودارهای بار - تغییر شکل بدست آمد. الگوی کمانشی اتفاق افتاده در نمونه ها پس از انجام تست ها مورد مطالعه قرار گرفت. به طور کلی، تمامی نمونه ها، به دلیل وجود فضای خالی بین هسته و ورق پرکننده، کمانش حول محور قوی هسته ی خود داشتند (شکل ۲-۲۱). کمانش های موضعی الاستیک برای برخی نمونه ها با اتصال پیچی مشاهده گردید. این تغییر شکل های موضعی معمولا در نزدیکی انتهای نمونه ها دیده شد.



شکل (۲-۲۱) کمانش هسته حول محور قوی[۷]

به طور کلی تمامی نمونه ها به جز نمونه ی اول عملکرد مورد رضایت و منحنی هیسترزیس پایداری داشتند، مشاهدات خاص و نتایج از هر سری آزمایش ها در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت. مقایسه عملکرد نمونه های یک و دو مشخص کرد که اتصال جوشی تکه ای با فواصل زیاد منجر به عملکردی نامطلوب در نمونه می گردد. نمونه اول تا حد کرنشی یک درصد عملکرد خوبی داشت. ولی افت سطح بارهای اولین چرخه ی فشاری در کرنش ۱,۵درصد اتفاق افتاد و هر چه میزان کرنش بیشتر شد این افت مقدار بیشتری پیدا کرد. به دلیل خمش ورق های پرکننده طی چرخه ی دوم در کرنش ۱,۵درصد فشاری، مقاطع مورد استفاده در مکانیزم مفید کننده از هم جدا شدند، به صورتی که وقتی آزمایش متوقف شد، فاصله ی آزاد بین این مقاطع به ۱۳ میلی متر رسیده بود.



شکل (۲-۲۲) کمانش و تغییر شکل موضعی درنمونه ها[۷]

با بررسی عملکرد نمونه های سوم و چهارم می توان نتیجه گرفت که پیچ هایی که با دستگاه بسته شده اند منجر به ایجاد اصطکاک زیاد می گردند. به همین علت مقادیر ضریب ω در نمونه ی سوم بیشتر از نمونه ی چهارم می باشد، هر چند نمونه ی چهارم به خاطر اثر لغزش عملکرد ضعیف تری از خود نشان داده بود. طی چرخه ی دوم در حد کرنشی دو درصد، غلاف کاملا لغزید و به قسمت انتهایی صلیبی شکل هسته برخورد کرد که موجب انتقال بار به غلاف گردید.

استفاده از خال جوش بین هسته و یکی از مقاطع مکانیزم مقید کننده (نمونه های پنجم و ششم) از لغزش عمودی غلاف جلوگیری کرده و بر روی عملکرد کلی نیز اثر منفی نداشته است. در مقایسه عملکرد این دو نمونه، مشاهده گردید که وجود نقص ساخت اولیه در نمونه ی پنجم تأثیر خاصی بر عملکرد کلی آن نداشته است، ولی تغییر شکل های موضعی پلاستیک و کمانش های موضعی هسته حول محور ضعیف در این نمونه دیده شد.

مقادیر کرنش های اندازه گیری شده در طول نمونه ها مشخص کرد که در نمونه های دوم و سوم توزیع کرنش در طول نمونه غیر یکنواخت بوده است، کرنش ها اغلب در دو انتهای هسته متمرکز شده بودند. این نمونه ها دارای اتصال جوشی پیوسته با اتصال پیچی بسته شده با دستگاه بودند. در نمونه ی چهارم نیز به علت لغزش غلاف، توزیع کرنش ها یکنواخت نبود. ولی نمونه های پنجم و ششم توزیع کرنش نسبتا یکنواختی در طول هسته داشتند.

به طور کلی از آزمایش های سری اول مشخص شد که نمونه ی ششم بهترین عملکرد را داشته و بنابراین این جزئیات بندی در آزمایش های سری دوم هم به کار گرفته شد. از مشاهدات آزمایش های سری اول میتوان نتیجه گرفت که:

ایجاد فضای خالی تنها در جهت عرض هسته برای جلوگیری از کمانش های موضعی مناسب و کافی به نظر می رسد.

اصطکاک را می توان با استفاده از مصالح جداکننده کاهش داد (استفاده از گریس به همراه پلی اتیلن نتایج بهتری دارد). همچنین بستن پیچ ها با دست نیز در اتصالات پیچی به کاهش اصطکاک کمک خواهد کرد.

به منظور جلوگیری از لغزش می توان قسمت میانی هسته را به کمک خال جوش به غلاف متصل نمود.

تفاوت میان ماکزیمم نیروی کششی و فشاری در نمونه ی ششم حدود ۱۰ درصد بود که معیار آیین نامه AISC را برآورده می کند.

در آزمایش های سری دوم به منظور کاهش نیروهای اصطکاکی و همچنین ایجاد کرنش های یکنواخت در طول هسته، در اتصال غلاف از جوش های تکه ای با فواصل نزدیک استفاده شد، عملکرد نمونه های هفتم و هشتم نشان داد که اعضای با مقاطع موجود در مکانیزم مقید کننده در برابر کمانش که اتصال این اعضا به خوبی فراهم شده باشد، حلقه های هیسترزیس پایداری را ایجاد می کنند.

با توجه به ضخامت ثابت ۵ میلی متری هسته در نمونه ها، هر چه نسبت ابعادی در نمونه ای بیشتر باشد، در حقیقت عرض هسته و متعاقبا مساحت آن افزایش می یابد. بنابراین نسبت P_{cr}/P_y کوچکتر

می شود. در نمونه های سری دوم این اتفاق می افتد اما همچنان این نسبت بزرگتر از ۱۵ باقی می ماند. همچنین بررسی توزیع کرنش در طول هسته ها مشخص کرد که اغلب نمونه ها توزیع کرنش یکنواختی داشتند. چرخه های اضافی در کرنش دو درصد منجر به شکل پذیری تجمعی ۶۰۰ برابر تغییر شکل حد تسلیم در نمونه ی ۱۱ شد در مورد نمونه ی ۱۲ اعمال این چرخه های اضافی منجر به شکل پذیری تجمعی ۴۵۰ شد که به دلیل بزرگتر بودن ابعاد هسته در این نمونه بود. بنابراین مکانیزم مقید کننده ی سخت تری مورد نیاز بود. بنابراین قرار دادن سخت کننده در سیستم مقید کننده به عنوان یک راه حل برای افزایش تغییر شکل های تجمعی، در مطالعات آینده می تواند مورد بررسی قرار گیرد.

به عنوان مهمترین دست آورد این مطالعه می توان نتیجه گرفت که با ایجاد تماس مستقیم بین هسته و غلاف در جهت ضخامت هسته (محور ضعیف هسته)، کمانش های موضعی هسته می تواند حداقل شود. همچنین در سطح تماس هسته و غلاف استفاده از مصالح جداکننده می تواند به یکنواختی توزیع کرنش در طول هسته کمک کند. استفاده از این مصالح همچنین می تواند به کاهش اصطکاک ایجاد شده بین غلاف و هسته منجر گردد. بنابراین با توجه به اینکه هزینه مصالح جداکننده در برابر هزینه های اجرایی BRB ناچیز است ولی تأثیرات مثبت زیادی بر عملکرد آن دارد، استفاده از این مصالح در محل تماس هسته و مکانیزم مقید کننده توصیه می گردد.

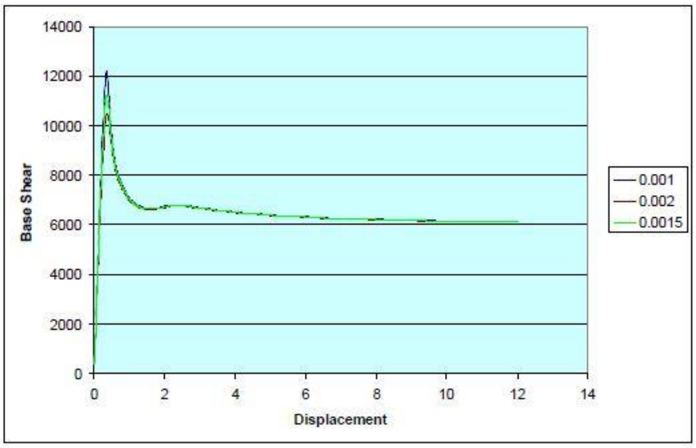
۲-۱۰-۲- مطالعه داوران و همکاران [8]

در این مقاله رفتار غیرخطی - غیرالاستیک قابهای مهاربندی شده ویژه هم مرکزSCBF[1]با قابهای مهاربندی شده ضدکمانشیBRBF مقایسه شده است. سازه های مختلفی با تعداد متفاوتی طبقه که قبلا بوسیله آیین نامه های موجود طراحی گردیده بودند، بوسیله نرم افزارOPENSEES آنالیز استاتیکی

[1] Special Concentrically Braced Frame

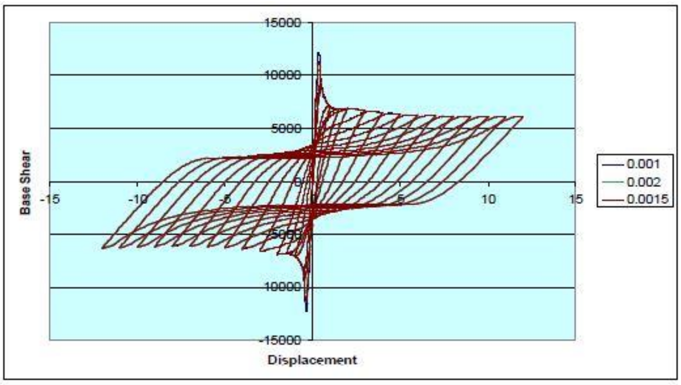
غیر خطی شده و رفتار بار افزون و چرخه ای آنها برای هر دو نوع مهاربند تعیین گردیدند. مقایسه نتایج، حاکی از رفتار شکل پذیرتر و پایدارتر مهاربند ضد کمانشی نسبت به بادبند معمولی می باشد. همچنین اثر میزان نقص هندسی اولیه بادبند و میزان سخت شوندگی کرنشی بادبند بر رفتار سازه ها بررسی شده و رفتار بار افزون و چرخه ای آنها تعیین شدند.

تحت تحلیل بار - افزون، مقدار اولیهٔ انحراف، فقط برای جابجای اولیه و کوچک حساس می باشد (۱cm) به طوریکه هر چقدر مقدار این انحراف بزرگ تر باشد، به ازای آن برش پایه ی کمتری درجابجایی کوچک ایجاد می شود که در مرحله افزایش سختی قبل ازکمانش صورت می گیرد، طوریکه بعد از وقوع کمانش، اثر این انحراف نیز از بین خواهد رفت و سه منحنی بر هم منطبق خواهند شد و بیشترین مقدار برش پایه به ازای کمترین میزان انحراف اولیه خواهد بود شکل (۲-۲۳).



شکل (۲-۲۳) مقایسه تاثیر انحراف اولیه در رفتار قاب یک طبقه یک دهانه برای تحلیل بار- افزون[۸]

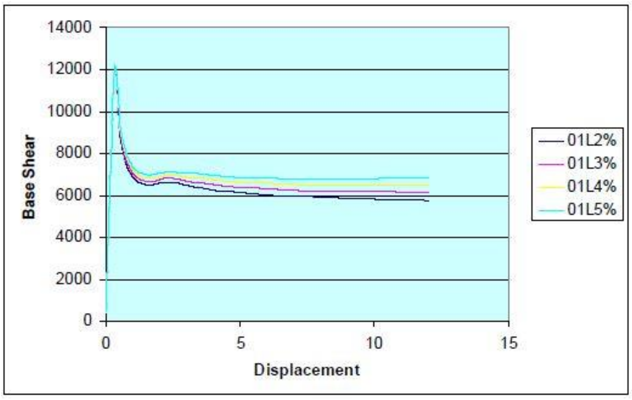
تحت بارگذاری چرخه ای، میزان انحراف اولیه فقط برای چرخه های اول و جابجایی های کوچک موثر خواهد بود تا حدود (۲cm) و بعد از چندین چرخه ی اول، اثر این انحراف از بین خواهد رفت و منحنی ها بر هم منطبق خواهد شد (شکل ۲-۲۴).



شکل (۲-۲۴) مقایسه تاثیر انحراف اولیه در رفتار قاب یک طبقه یک دهانه برای تحلیل چرخه ای[۸]

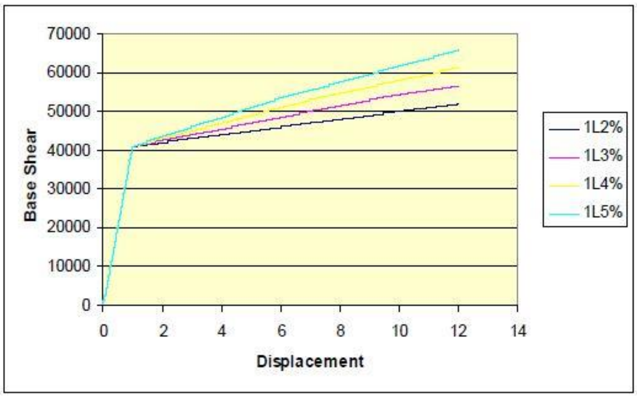
برای بررسی اثر میزان در صد سخت شوندگی کرنشی که برای فولادهای معمولی ، مقدار آن متفاوت می باشد؛ قابهای مختلف دارای سیستم بادبندی معمولBRB با درصدهای مختلف سخت شوندگی وکرنشی مورد تحلیل چرخه ای و بار- افزون قرار گرفتند که نتایج آن برای سازه های مختلف به شرح زیر می باشد:

با توجه به شکل (۲-۲۵) با افزایش میزان سخت شوندگی کرنشی میزان برش پایه در مراحل قبل و بعد از کمانش افزایش می یابد . همچنین شیب منحنی که متناسب با در صد سخت شوندگی کرنشی می باشد برای ٪۵ که بالاترین درصد، درنظر گرفته شده است نسبت به بقیه درصدها بیشتر می باشد.



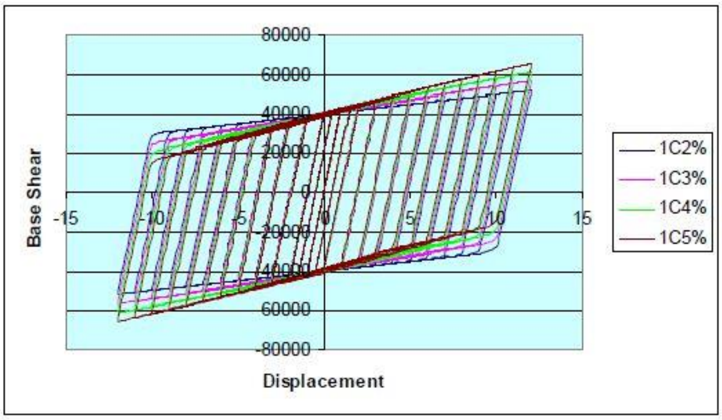
شکل (۲-۲۵) بررسی تاثیر میزان درصد سخت شوندگی کرنشی در رفتار قاب یک طبقه یک دهانه یک طبقه دارای بادبند معمولی برای تحلیل بار- افزون[۸]

با افزایش میزان سخت شوندگی کرنشی مطابق شکل (۲-۲۶) میزان برش پایه افزایش می یابد. همچنین شیب منحنی که متناسب با درصد سخت شوندگی کرنشی می باشد برا ی ۵٪ که بالاترین درصد درنظر گرفته شده است، نسبت به بقیه درصدها بیشتر می باشد.



شکل (۲-۲۶) بررسی تاثیر میزان درصد سخت شوندگی کرنشی در رفتار قاب برای تحلیل بار- افزون BRB یک دهانه یک طبقه دارای بادبند[۸]

شکل (۲-۲۷) تاثیر میزان درصد سخت شوندگی کرنشی در رفتار قاب تحت بارگذاری چرخه ای را نشان BRB یک دهنه یک طبقه بادبند می دهد همانطوریکه مشاهده میشود با افزایش میزان سخت شوندگی کرنشی شیب چرخه ها هم افزایش پیدا می کند همچنین به ازای بیشترین مقدار سخت شوندگی کرنشی، بیشترین مقدار برش پایه را خواهیم داشت.



شکل (۲-۲۷) بررسی تاثیر میزان درصد سخت شوندگی کرنشی در رفتار قاب برای تحلیل چرخه ای BRB یک دهانهیک طبقه دارای بادبند[۸]

نتیجه گیری

۱- تحلیلهای انجام گرفته موید این مطلب است که بادبندهای کمانش تاب در مقایسه با بادبندهای معمولی رفتار پایدارتر و همچنین شکل پذیرتری از خود نشان می دهند و همچنین خاصیت جذب انرژی این سیستم ها به دلیل تشکیل چرخه های بلند تر و عریض تر هیسترزیس در آنها بیشتر می باشد.

۲- نقص هندسی به ازای مقادیر کوچکتر جابجایی و فقط در چرخه های اول موثرتر می باشد به طوریکه رفته رفته با افزایش جابجایی و در چرخه های عریض تر حساسیت سیستم نسبت به انحراف اولیه از بین می رود.

۳- میزان در صد سخت شوندگی کرنشی ارتباط مستقیمی با میزان برش پایه سیستم دارد. و بیشترین میزان برش پایه مربوط به بالاترین در صد سخت شوندگی کرنشی می باشد.

۲-۱۰-۳- تحقیقات شارع و همکاران [9]

در این تحقیق به بررسی و مقایسه عملکرد لرزه ای قاب های مهاربندی شده مقاوم در برابر کمانش با دو سیستم مهاربندی همگرا (CBF) وقاب خمشی ویژه (SMF)[۱] پرداخته شده است. بدین منظور تعدادی مدل BRBF در طبقات مختلف، با دو نوع اتصال ساده و صلب تیر به ستون و نیز تعدادی مدل CBF و SMF با شرایط بارگذاری و ابعاد یکسان انتخاب و مطابق با AISC-2005 و نیز استاندارد ۲۸۰۰ ایران طراحی شدند. در مرحله بعد با استفاده از آنالیز غیرخطی پوش آور به مقایسه رفتار لرزه ای سیستم ها پرداخته شد. در این تحقیق پارامترهایی همچون تغییرمکان های طبقات، برش پایه، ضریب رفتار و نیز وزن فولاد مصرفی در هر یک از سیستم ها مورد بررسی ومقایسه قرار گرفته است.

مقایسه بین مقادیر برش پایه بدست آمده برای مدل های مورد مطالعه نشان میدهد، سیستم CBF با

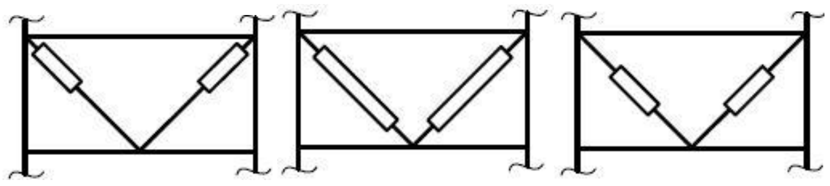
[۱] Special Moment Frame

توجه به ضریب رفتار کمتر آن، دارای مقادیر برش پایه بسیار بیشتری در مقایسه با ۳ سیستم دیگر است. مقدار کم برش پایه بدست آمده برای سیستم BRBF ، سبب کاهش در هزینه ساخت و تقویت فونداسیون سازه در مقایسه با سیستم CBF میشود. این مزیت میتواند هزینه بالای ساخت و نصب BRB را توجیه سازد.

مقایسه ضریب رفتارهای محاسبه شده نیز نشان میدهد، ۲ سیستم BRBF ، نسبت به SMF و CBF مقادیر ضریب رفتار بیشتری را نشان میدهند. این افزایش برای قاب های کوتاهتر بسیار چشمگیرتر است، ولی با افزایش ارتفاع قاب ها، مقادیر ضریب رفتار ۲ سیستم BRBF ونیز SMF بهم نزدیک میشوند.

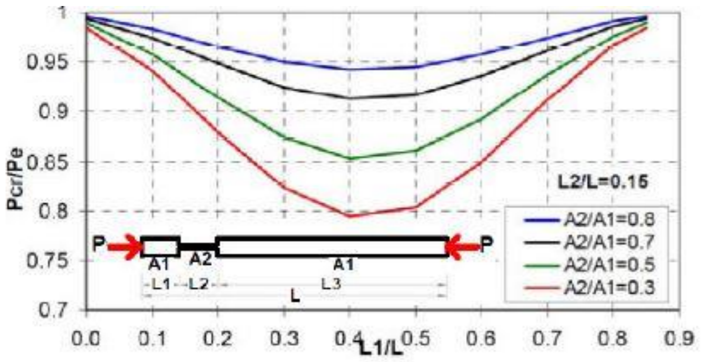
۲-۱۰-۴- مطالعه میرقادری واهل حق

همانطور که در شکل (۲-۲۸a) نشان داده شده است در غالب BRBs متداول به جز ناحیه گاست پلیت غلاف به طور کامل برروی هسته قرار گرفته است.در مطالعه ای که توسط ترامبلی و همکاران انجام شده بود طول غلاف کاهش داده شده و در قسمت میانی مهاربند قرار گرفته بودشکل (۲-۲۸b). بایستی توجه نمود که کاهش طول غلاف احتمال وقوع کمانش کلی را افزایش خواهد داد. به همین منظور کنترل کمانش کلی مهاربند به عنوان یکی از ضوابط طراحی مهاربند های کمانش تاب باید در نظر گرفته شود. در سال ۲۰۰۸ میرقادری و اهل حق [10] بار کمانشی یک عضو محوری بایک مقطع ضعیف در طول محدودی از آن را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که هرچه مقطع ضعیف به یک انتهای مهاربند نزدیک می شود بار کمانشی عضوافزایش می یابد. به عبارت دیگر حداقل بار کمانشی مربوط به زمانی است که مقطع ضعیف در وسط مهاربند واقع شده و حداکثر آن مربوط به قرار گیری مقطع ضعیف در انتهای مهاربند است شکل (۲-۲۹).



(a)　　(b)　　(c)

شکل (۲-۲۸) طول نرمال و کاهش یافته BRBs با موقعیت های مختلف قرار گیری هسته[۱۰]

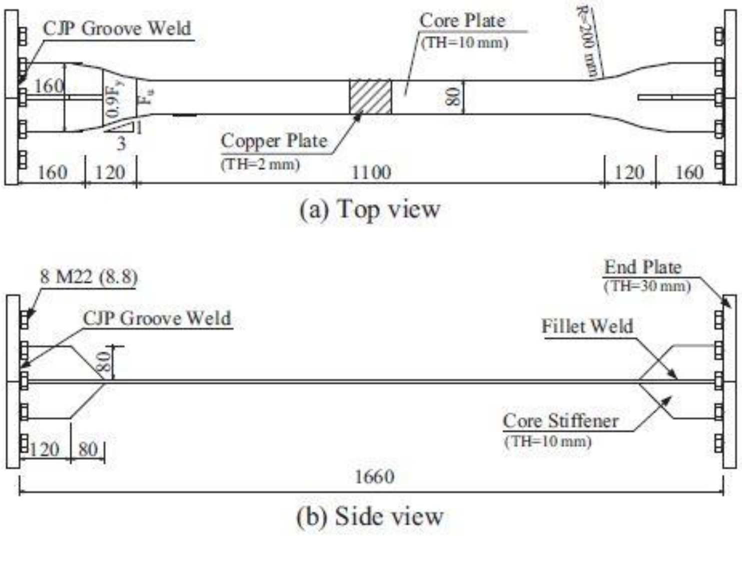


شکل (۲-۲۹) تغییر میزان بار کمانشی با تغییرموقعیت مقطع ضعیف[۱۰]

همانطور که انتظار می رفت با افزایش طول مقطع ضعیف بار کمانشی بحرانی افزایش می یابد. جلو گیری از وقوع کمانش کلی ضابطه اصلی طراحی مهاربندهای RLBRBs است، بنابراین با انتخاب طول کوتاه تر و موقعیت هسته در یک انتها، حداقل کاهش در ضوابط بارکمانشی مهاربند حاصل شده که این امر بسیار مقرون به صرفه نیز خواهد بود. از نقطه نظر عملکردی، هدایت موقعیت قرار گیری RLBRB به یک انتهای عضو سبب می شود که فیوزBRB قابلیت جایگذاری راحت و الگوی کاربردی X در قاب های مهاربندی را بدست آورد. بنابراین به منظور توسعه ایده RLBRBs ، ناحیه تسلیم به انتهای مهاربند منتقل می گردد شکل(۲-۲۸c) و طول هسته تا جایی کاهش می یابد که از خرابی خستگی کم سیکلی(LCF) جلوگیری کند.

۲-۱۰-۵- مطالعه رضوی و همکاران

رضوی و همکاران در سال ۲۰۱۴ [11] به منظور تسهیل در استفاده از RLBRBs ،ایده کاهش طول هسته و غلاف راپیشنهاد دادند.این ایده می‌تواند سبب سبکترشدن و قابلیت نصب و جایگذاری راحترRLBRBs در قابهای مهاربندی را فراهم آورد. بدین منظور رضوی و همکاران مطالعه آزمایشگاهی و عددی را بروی ۲ نمونه RLBRB تمام فولادی انجام دادند.در این مطالعه به منظور جلوگیری از اصطکاک بین هسته و غلاف و همچنین حفظ غلاف برروی هسته مکانیزم های خاصی را پیشنهاد نمودند. به دلیل کوتاه شدن طول هسته و غلاف و به دنبال آن وقوع پدیده خستگی کم سیکلی به طور ویژه به آن پرداخته شده است. مدل ها تحت پروتکل بارگذاری شبه استاتیکی قرار گرفته و نتایج حاکی از پاسخ هیسترزیس پایدار و متقارن نمونه بوده است. ۲ نمونه در تمامی جزئیات به جزپروتکل بارگذاری و سخت کننده های غلاف مشابه بودند. اتصال غلاف ها توسط پیچ صورت گرفته بود تا قابلیت بازرسی هسته بعد از زلزله فراهم گردد از طرفی هم سبب می شد که از غلاف و فیلر که آسیب ندیده اند مجددا استفاده گردد. RLBRB متشکل از هسته،غلاف، فیلر،End Plate،سخت کننده ها و ورقه مسی مطابق شکل (۲-۳۰) می باشد که شرح آن در ادامه می آید.



شکل (۲-۳۰) جزئیات اعضا مهاربند[۱۱]

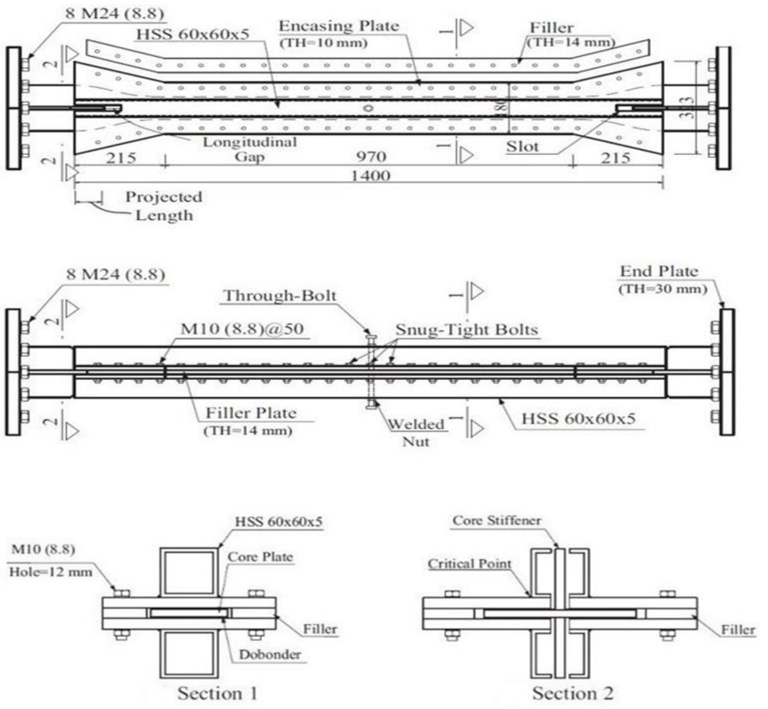
- هسته

حداکثر ظرفیت کششی دستگاه آزمایش برابر ۵۰۰کیلو نیوتن می باشد و انتخاب سطح مقطع هسته براساس همین مقدارصورت گرفته است. ازاین رو یک ورق با سطح صاف با ابعاد ۱۰*۸۰ میلی مترمربع از فولاد(DIN17100) ST 37-2 با مقاومت تسلیم اسمی ۲۳۵و مقاومت نهایی ۳۶۵ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است. امانتایج بدست آمده برای فولاد مورد نظر در آزمایش کوپان براساس استاندارد ASTM A270 مقادیر مقاومت تسلیم نمونه را برابر ۲۴۸ و مقاومت نهایی آن را ۴۰۲ مگا پاسکال گزارش می دهد.طول هسته به گونه ای محاسبه گردیده که قابلیت تحمل پروتکل بارگذاری استانداردهای ASCE 7-10 و AISC 341-10 را داشته باشد. بدین منظور با در نظر گرفتن روابط ماینر و ناکامورا که در بخش های بعدی ارائه می شود، با فرض دریفت طراحی طبقه ۱٫۵ درصد برای یک قاب با دهانه ۵ و ارتفاع ۳ متر و الگوی قرارگیری مهاربند به صورت شورون، طول مورد نیاز هسته برای اقناع استانداردAISC 341-10 تقریباً ۱۱۰۰ میلی متر خواهد شد.

- غلاف

غلاف در واقع به منظور جلوگیری از کمانش کلی و محدود نمودن کمانش موضعی هسته استفاده می شود.این اعضا برای نیروهای اعمالی از طرف هسته در نقاط تماس با یکدیگر طراحی می شوند.جنس مصالح استفاده شده برای غلاف مشابه مصالح هسته و ابعاد آن برابر ۱۰*۱۸۰ میلی مترمربع که توسط یک مقطع باکس شکل با ابعاد ۵*۶۰*۶۰ میلی مترمربع مقاوم سازی شده است. جنس باکس از فولاد(DIN17135) A- ST52 با مقاومت تسلیم ۳۳۵ و مقاومت نهایی ۵۱۰ مگا پاسکال که بوسیله جوش به طور کامل به غلاف متصل شده است.در BRBs متداول به منظور جلوگیری از کمانش کلی الاستیک می بایست ضوابط واتانایب[۱۲] کنترل گردد. به منظور اتصال غلاف ها به یکدیگر از ورق هایی به ابعاد ۱۴*۵۰ میلی مترمربع که فیلر نامیده می شوند استفاده شده است. اتصال غلاف ها توسط پیچ بوده و فاصله آنها به صورتی است که باید نزدیک به طول موج کمانشی بزرگتر باشد تا بتواند در برابر

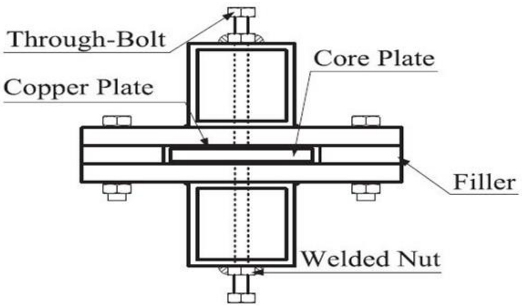
کمانش های موضعی مقاومت کند. دانیلو و همکاران[13] روشی را به منظور محاسبه تعداد و طول موج کمانشی براساس معادل سازی بار کمانشی مود بزرگتر هسته به مقاومت محوری هسته، پیشنهاد دادند. براین اساس تعداد و طول موج کمانشی (L_w) مهاربندهای کمانش تاب با طول کوتاه به ترتیب ۲۷ و ۴۴ میلی متر خواهد بود.همچنین فاصله پیچ ها (L_b)، ۵۰ میلی متر مرکز تا مرکز انتخاب گردید. چو و همکاران[14] نسبت($\frac{L_b}{L_w}$) را در آزمایشات بین مقادیر ۰٫۳ تا ۲٫۲ متغییر می دانند و بیان کردند که برای اهداف طراحی این نسبت بهتر است کمتر از ۲٫۱ باشد. به منظور جلوگیری از اصطحکاک بیش از حد میان هسته وغلاف، که ممکن است ناشی از انبساط هسته تحت اثر پواسون باشد ، فیلر ها به گونه ای طراحی شده اند که یک فاصله یک میلی متری در راستای ضخامت و فاصله ۳ میلی متری در راستای عرض برقرار شود.جهت تسهیل حرکت هسته بدون برخورد سخت کننده های انتهایی روی آن با مقطع باکس شکاف هایی طولی(Longitudinal gap) بروی باکس ایجاد شده است. طول شکاف لااقل برابر نصف تغییر مکان حداکثر فشاری است و حتی بزرگتر از آن تا از تحمل بار توسط غلاف جلوگیری گردد. به منظور محدود نمودن هرگونه اصطحکاک بین هسته و غلاف که احتمال وقوع پدیده خرابی خستگی کم سیکلی را افزایش می دهد از مصالحی همچون سرامیک،پلی اتیلین و گریس استفاده شده است.سرامیک به غلاف متصل گردیده و به صورت الاستیک عمل نموده و در نتیجه تغییر شکل های کمی را تجربه خواهد کرد.در دو سطح هسته که با غلاف در تماس است از دو لایه پلی اتیلین به ضخامت ۰٫۵ میلی مترو گریس صنعتی به منظور کاهش اثرات اصطحکاک و جلوگیری از خردشدگی سرامیک استفاده شده است. در شکل (۲-۳۱) جزئیات مدل به طور کامل نشان داده شده است.



شکل (۲-۳۱) جزئیات مدل آزمایشگاهی مهاربند پیشنهادی رضوی و همکاران[۱۱]

- عامل مقید کننده غلاف برروی هسته

روشهای مختلفی برای جلوگیری از حرکت غلاف بروی هسته در پژوهش های مختلف پیشنهاد شده است. یکی از از این روشها استفاده از اثر اصطحکاک می باشد اما به دلیل غیر قابل پیش بینی بودن و کم بودن مقدار عددی آن و همچنین عملکرد نامطلوب و عدم رضایت بخش آن در کارهای گذشته پیشنهاد نمی شود[7-15-16]. در این پژوهش به منظور حفظ غلاف برروی هسته جزئیات جدیدی پیشنهاد می شود همانطور که در شکل (۲-۳۲) مشاهده می گردد. بدین منظور از دو ورق مسی با ابعاد ۲*۱۰۰*۸۰ میلی متر که مدول الاستیسیته آن نصف مدول الاستیسیته فولاد است استفاده شده است.



شکل (۲-۳۲) جزئیات اعمالی جهت حفظ غلاف برروی هسته[۱۱]

- جزئیات مدل سازی در نرم افزار آباکوس

مدل سازی اجزا محدود BRBs در نرم افزارAbaqus توسط محققان زیادی در سال های اخیر انجام شده است[19-18-17]. به عنوان نمونه کروزکوا و همکاران تست لرزه ای یک BRB تمام فولادی که توسط ترامبلی و همکاران انجام شده بود را مدل سازی عددی نمودند[19] .چو و چن [18]نیز آنالیز اجزا محدودی بروی دو نمونه BRB (نمونه های ۱ و ۴) انجام دادند. رضوی و همکاران [17]هم یک مطالعه همبستگی برروی یک BRB تمام فولادی که توسط اریاشار و همکاران آزمایش شده بود را انجام دادند[7] . در مطالعه حاضر مدل شامل ورق هسته،فیلر،غلاف،ورق های انتهایی و سخت کننده ها است. باید توجه نمود که چون هسته تحت تغییر شکل های پلاستیک بالا و مود کمانشی زیاد واقع می شود لازم است که برای مدل سازی آن از مدل C3D20 استفاده شود.این المان برای تغییر شکل های بزرگ مناسب بوده و هر ۲۰گره ۳ درجه آزادی دارند[20]. و برای سایر اعضا از المان C3D8 استفاده شده است.هسته در راستای عرض به ۶ بخش و در راستای ضخامت به ۲ بخش تقسیم شده است. مدل به طور کلی شامل ۷۵۴۶ المان بوده که ازاین مقدار ۱۱۸۴ المان آن مربوط به هسته است. در مورد مش بندی قابل ذکر است که آنالیز حساسیت مش نشان داده که با افزایش تعداد المان ها دقت نتایج کاهش خواهد یافت. پیچ هایی که برای اتصال غلاف به کار میروند چون سختی محوری بالایی دارند در مدل سازی به صورت نقاط مقید tie در نظر گرفته شده اند.

به منظور لحاظ خصوصیات تماسی هر دو رفتار نرمال، بدون هر گونه نفوذ و تماس برروی چهار سطح هسته و سایر سطوح مرتبط در نظر گرفته شده است. گنا و همکاران [21] ضریب اصطکاک را براساس نتایج آزمایشگاهی و عددی برای سطح تماس فولاد به فولاد که روغن کاری هم شده است ۰,۱۵ پیشنهاد نمودند.همچنین ارياشار و همکاران [22] ضریب اصطحکاک را برای سطح تماس بین فولاد و سطح پوشیده شده از گریس و پلی اتیلین ۰,۱ ارائه دادند. از آنجاییکه پژوهش های محققان بیانگر مطابقت خوب ضریب اصطکاک حاصل از کارهای گنا و همکاران در کارهای آزمایشگاهی با کارهای عددی است لذا در این پژوهش مقدار ۰,۱۵ را به عنوان ضریب اصطکاک لحاظ کرده ایم. مدول الاستیسیته و ضریب پواسون به ترتیب ۲۰۰گیگا پاسکال و ۰,۳ است. از هردو رفتار پلاستیک شامل سخت شدگی ایزوتروپیک و کینماتیک برای هسته استفاده شده است. براساس نتایج حاصل از آزمایش کوپان برروی ST 37-2، پارامتر های سخت شوندگی به شرح زیر بیان می گردد:

دو تا بک استرس با مقاومت تسلیم ۱۵۷ مگا پاسکال و مدول سخت شوندگی کینماتیکی C1=4600 و C2=98000 مگا پاسکال و فاکتور نسبت سخت شوندگی کینماتیکی Y1=25 و Y2=1000 و همچنین مقدار حداکثر تغییرات در تنش تسلیم برابر Qb=110 مگاپاسکال و فاکتور نسبت b=4 برای مولفه های ایزوتروپیک لحاظ شده است. نقص اولیه ای به صورت یک فاصله بین غلاف و هسته، که برابر نصف ضخامت فاصله موجود بین هسته و غلاف است، برای تغییر شکل سینوسی هسته در وسط آن لحاظ شده است.این نقص بدین منظور لحاظ شده است تا شرایطی را ایجاد کند که هسته قبل از آزمایش هیچ تنشی را تجربه نکند.

- نتایج

۱. به طور کلی نمونه ۱ و ۲ ضوابط استاندارد AISC 341-10 را در زمینه BRBs برآورده نموده است وجابجایی و شکل پذیری زیادی را نشان داده اند.

۲. مکانیزم توقف پیشنهادی با استفاده از صفحه مسی و مکانیزم debonding شامل خمیر سرامیکی ، فیلم پلی اتیلن و گریس به طور رضایت بخش اجرا شد و عملکرد بسیار مناسبی را ارائه دادند.

۳. تجزیه و تحلیل FE[۱] نشان می دهد که RLBRB ظرفیت اتلاف انرژی بیشتری را در مقایسه با BRB معمولی با طول کامل دارند.

۲-۱۰-۶- تحقیقات ترمبلی و همکاران

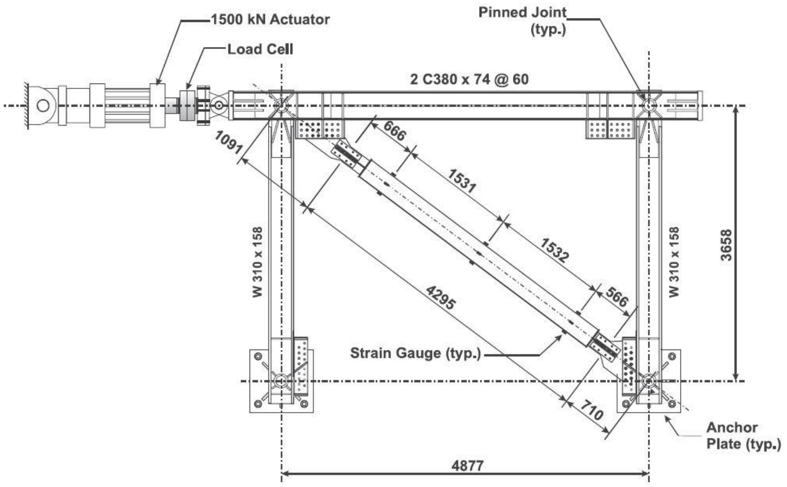
در سال ۲۰۰۶ ترمبلی و همکاران [19] شش نوع مهاربند مقید در برابر کمانش را تحت قاب آزمایش و عملکرد آنها را بررسی کردند شکل (۲-۳۳)، دو طول هسته متفاوت و همچنین دو مکانیزم مقید کننده در برابر کمانش مورد مطالعه قرار گرفت. تستها تحت قاب های افقی انجام گرفت و پروتکل اعمالی به صورت دریفت طبقه و توسط محرکهای دینامیکی با ظرفیت ۱۵۰۰ کیلونیوتن اعمال شده است.

- نمونه ها

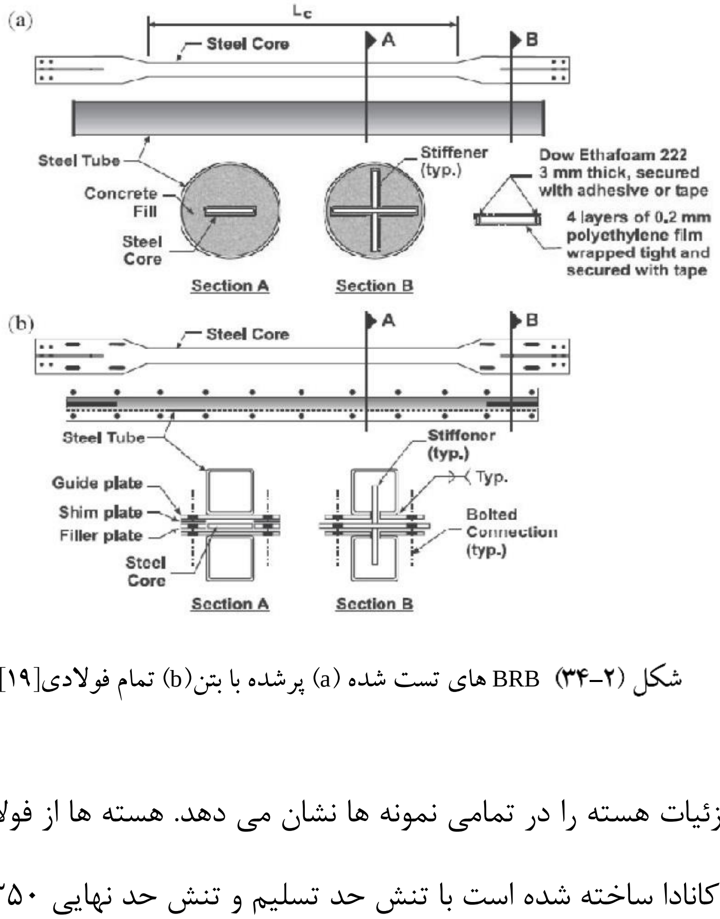
در آزمایش ترمبلی و همکاران شش نمونه مهاربند مقید در برابر کمانش تست شد که دو نمونه مهاربند با مکانیزم مقید کننده ی مرسوم شامل مقطع توخالی و بتن (C1-1,C1-2) و چهار نمونه دیگر تمام فلزی بودند(S1-1،S1-2،S2-1،S2-2) (شکل ۲-۳۴). مهاربندهای تمام فولادی از مصالح یکسانی و همچنین روشی یکسان در مقایسه با نمونه های پر شده با بتن ساخته شده بودند، تا بتوان عملکرد این دو گروه مهاربند را مقایسه کرد.

---

[۱] Finete Element



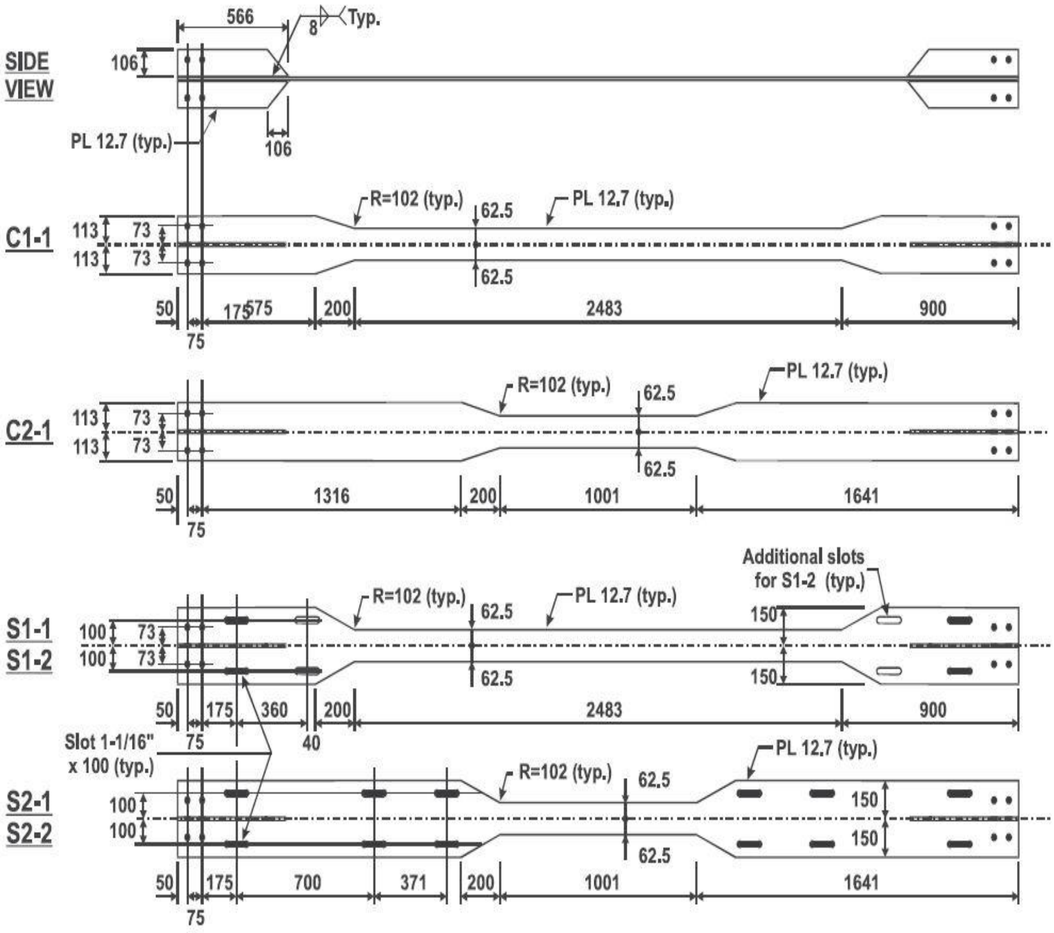
شکل (۲-۳۳) مجموعه تست تحت قاب تمامی ابعاد به میلی متر[۱۹]



شکل (۲-۳۴) BRB های تست شده (a) پرشده با بتن(b) تمام فولادی[۱۹]

شکل (۲-۳۵) جزئیات هسته را در تمامی نمونه ها نشان می دهد. هسته ها از فولاد wt G40.21-350 مطابق استاندارد کانادا ساخته شده است با تنش حد تسلیم و تنش حد نهایی ۳۵۰ و ۴۵۰ مگاپاسکال، کرنش در ابتدای سخت شوندگی برابر ۱,۹درصد و کرنش حد نهایی ۲۶,۸ درصد بودند. شیب ناحیه انتقالی در هسته ها ۱به ۴ (نسبت طول به عرض) و با شعاع انحنای ۱۰۲ میلی متر می باشد. مساحت

هسته تسلیم شونده برابر ۱۵۸۸ میلی متر مربع و بنابراین نیروی تسلیم مهاربند برابر ۵۸۷ کیلو نیوتن است. نواحی انتهایی به گونه ای طرح شدند که حتی با رسیدن هسته به حداکثر باربری در حد گسیختگی (Pu)، الاستیک باقی بمانند همچنین برای جلوگیری از کمانش تحت فشار، در آنها از سخت کننده استفاده شد.

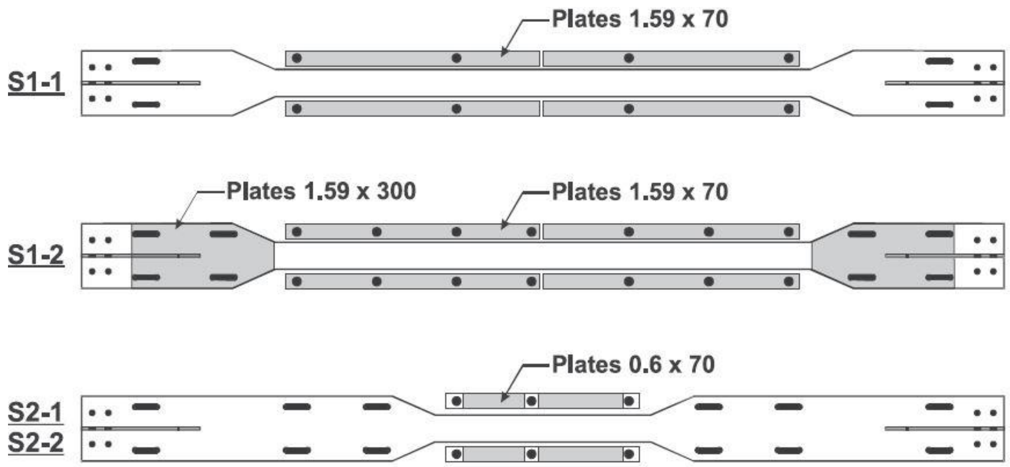


شکل (۲-۳۵) جزئیات هسته ی نمونه ها BRB [۱۹]

همان طور که در شکل (۲-۳۴) نیز دیده می شود، مصالح انعطاف پذیر به ضخامت ۳ میلی متر و از جنس Dow Ethafoarn ۲۲۲ در دو سمت کناری ورق هسته قرار گرفت تا اجازه ی انبساط هسته به خاطر اثر پواسن را بدهد. پس از آن، ورق هسته با ۴ لایه پلی اتیلن هر یک به ضخامت۰٫۲ میلی متردورپیچی شد تا پیوستگی بین هسته ی فولادی و بتن را کم کند، فاصله آزاد بین هسته فولادی و

بتن در عرض ورق فولادی براساس ماکزیمم کرنش مورد انتظار برابر ۲,۷۵ میلی متر انتخاب شد تا اجازه ی تغییر شکل آزادانه تحت فشار را به هسته بدهد. سیستم مقید کننده در برابر کمانش در مهار بندهای تمام فلزی، متشکل از یک جفت مقطع ASTM A500 HSS127x127x4 . 8 بود که هرکدام به یک ورق هادی به ابعاد ۱۰ میلی متر در ۲۷ میلی متر جوش شده بودند. پس از سرهم بندی اجرای این مهاربندها، ورق هسته مهاربند بین دو ورق هادی قرار گرفت و در دو سمت آن نیز ورق های پرکننده ضخامت۱۲,۷ میلی متر اجرا شدند. تمامی اجزای ذکر شده توسط پیچ هایی به فواصل ثابت متصل شدند (شکل ۲-۳۴). تفاوت مهاربندهای سری S1 با S2 طول هسته تسلیم شونده بود. دو نوع مهاربند در هر سری نمونه مشابه یکدیگر بودند با این تفاوت که اتصال پیچی متفاوتی داشتند.

نقش ورق پر کننده، فراهم کردن فضایی برای هسته در ضخامت آن برای انبساط تحت اثر پواسن بود. پیچ های متصل کننده مقطع تو خالی به ورق هادی، تا انتهای مهاربند ادامه پیدا کردند و سوراخهای لوبیایی در این نواحی ایجاد شد تا حرکت آزادانه ی مکانیزم مقید کننده نسبت به ورق اصلی مهاربند در این قسمتها فراهم کند. پیچ های قرار گرفته در طول ناحیه ی هسته توسط دستگاه بسته شدند در حالیکه پیچهای قرار گرفته در انتهای مهاربند (سوراخ لوبیایی) با دست بسته شدند تا انتقال بار بین ورق های هادی و ورق مهاربند از طریق اصطکاک به کمترین مقدار ممکن برسد. در شکل (۲-۳۶) نحوه قرار گیری ورق های پرکننده و پیچها دیده می شود. همانطور که دیده می شود فواصل پیچ ها در طول هسته ی مهاربند در نمونه ی S1-۱ برابر ۷۵۰ میلی متر و در نمونه ی S1-۲ نصف این مقدار است. همچنین در نمونه S1-۲ از ورق پرکننده ی اضافی نیز استفاده شده است. در نمونه های S2-۱ و S2-۲ از ورق های پرکننده ی نازک تری استفاده شد.



شکل (۲-۳۶) جزئیات آرایش پیچ ها درنمونه های BRB [۱۹]

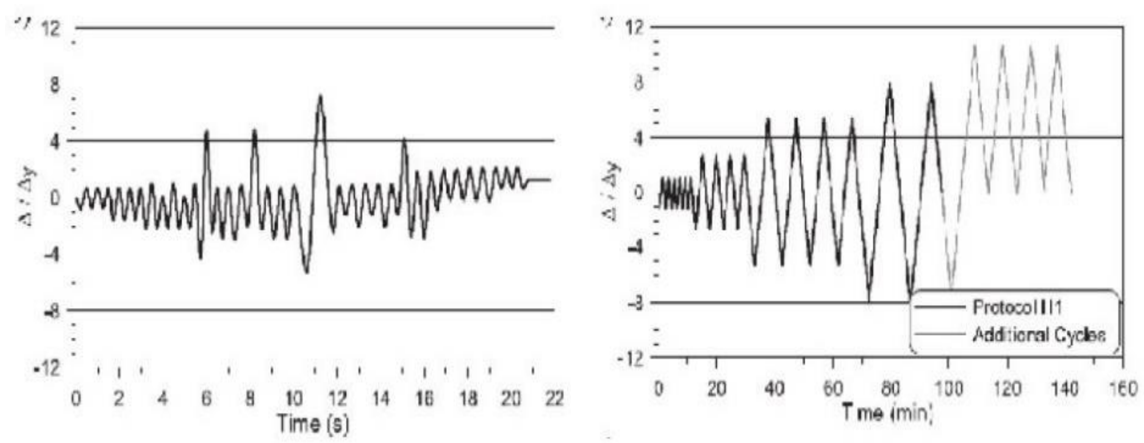
جدول (۲-۲) مشخصات اصلی هندسی نمونه های تست شده را به طور خلاصه نشان میدهد که در آن ها Bc،Lc و Tc به ترتیب طول، عرض و ضخامت هسته تسلیم شونده در مهار بند می باشند. همچنین در این جدول فاصله آزاد تأمین شده برای انبساط هسته در جهت ضخامت هسته دیده می شود.

جدول (۲-۲) مشخصات نمونه های تست شده[۱۹]

شماره تست	L_c (mm)	b_c (mm)	t_c (mm)	فاصله آزاد (mm)	K_0 (kN/mm)	Δ_y (mm)	K_0(آزمایش)/ K_0(پیش‌بینی شده)
C1-1	۲۴۸۳	۱۲۵	۱۲/۷	۱/۶	۵۶/۵	۸/۳۱	۱/۰۰
C2-1	۱۰۰۱	۱۲۵	۱۲/۷	۱/۶	۷۲/۳	۶/۵۰	۱/۰۴
S1-1	۲۴۸۳	۱۲۴/۶۰	۱۲/۷	۱/۴۸	۵۵/۶	۸/۴۴	۰/۹۶
S1-2	۲۴۸۳	۱۲۴/۸۶	۱۲/۶۶	۱/۵۲	۵۶/۴	۸/۳۲	۰/۹۷
S2-1	۱۰۰۱	۱۲۴/۸۶	۱۲/۷۲	۰/۸۵	۷۳/۵	۶/۳۹	۰/۹۶
S2-2	۱۰۰۱	۱۲۴/۶۶	۱۲/۶۹	۰/۵۸	۷۳/۵	۶/۳۸	۰/۹۶
S5-C	۴۰۸۹	۱۲۴/۵۵	---	---	۶۲/۵	۱۰/۷۶	---

- پروتکل های بارگذاری

دو نوع پروتکل متفاوت بارگذاری در آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. پروتکل بارگذاریH1 و منطبق بر پروتکل تأیید شده توسط الزامات آیین نامه آمریکا برای آزمایش مهاربندهای مقید در برابر کمانش تحت قاب بود. این پروتکل در شکل (۲-۳۷) قابل مشاهده است. پروتکل بارگذاری H2 بر مبنای یک کار تحقیقاتی از ترمبلی و بواتای (۲۰۰۲) ایجاد شد. این پروتکل از یک آنالیز غیر خطی تاریخچه زمانی قابهای دو، چهار و هشت طبقه مهاربندی شده توسط مهاربندهای مفید در برابر کمانش استخراج شد. این پروتکل بارگذاری هم در شکل (۲-۳۷) آمده است.



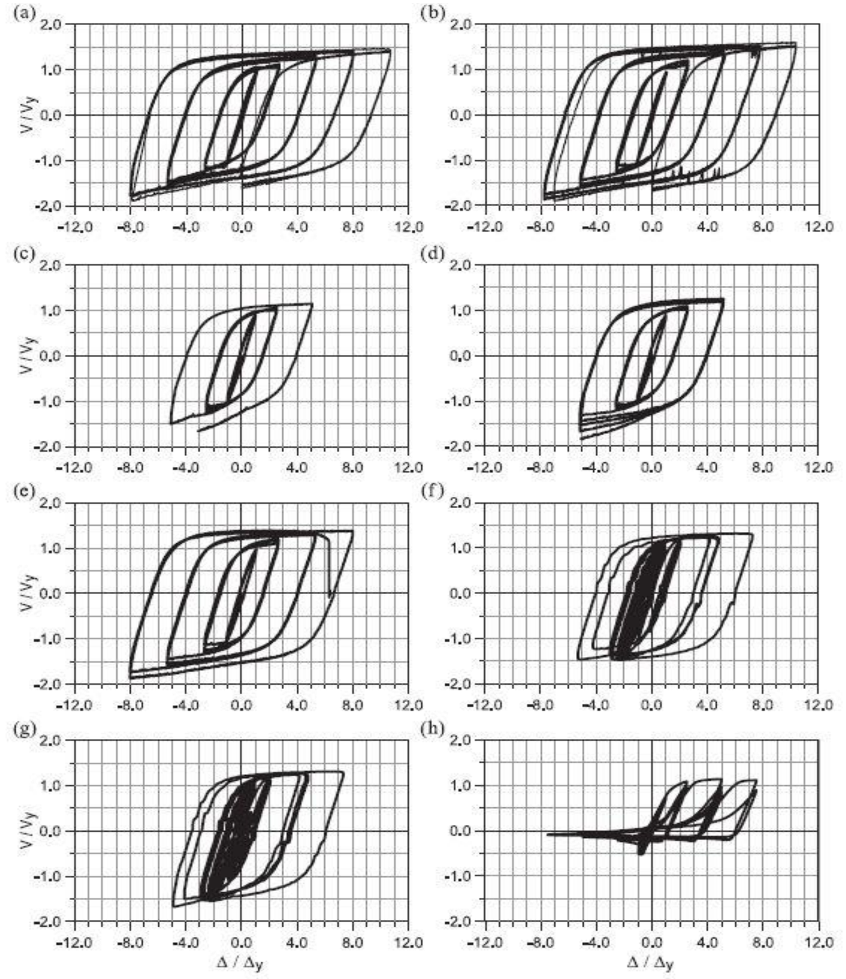
شکل (۲-۳۷) بارگذاری شبه استاتیکی(راست) بارگذاری دینامیکی(چپ) [۱۹]

- نتایج

شکل (۲-۳۸) منحنی بار جانبی تغییر شکل جانبی اندازه گیری شده در نمونه ها را نشان می دهد. نمونه های C1 – 1 , C1 - 2 عملکردی کاملا مشابه داشتند، منحنی بدست آمده از این نمونه شامل حلقه های هیسترزیس پایدار و تکرار شونده با افزایش مقاومت یکنواخت طی چرخه های بارگذاری بود و تا انتهای تست هیچ خرابی در نمونه ها مشاهده نشد. کرنش نهایی اتفاق افتاده در نمونه ها، با فرض کرنش یکنواخت در طول هسته، به ترتیب برابر ۲,۷درصد و ۵ درصد برای نمونه های C1 – 1 , C1 - 2 1می باشد. مقادیر کرنش اتفاق افتاده در نمونه ها، نشان دهنده ی ظرفیت کرنشی بالای مصالح فولادی

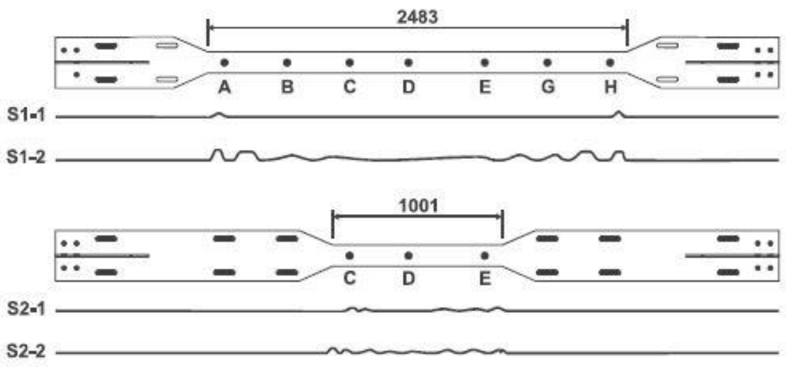
طی چرخه های بارگذاری شده می باشد که بدون افت مقاومتی با هرگونه گسیختگی و پارگی تا حدود کرنشی بالایی عملکرد مطلوب از خود نشان داده اند.

تست نمونه ی S1-۱ تحت بارگذاری H1 در سیکل Δy۵ قطع شد، زیرا در نواحی انتهایی مهاربند و ناحیه انتقالی کرنش های موضعی اتفاق افتاد. این پدیده به علت فضای خالی بزرگ اولیه (حدود ۱،۶ میلی متر) بین هسته و مکانیزم مقید کننده در برابر کمانش و همچنین فواصل زیاد پیچ ها در اتصال ورق های هادی به یکدیگر رخ داد. عوامل ذکر شده باعث شد تا تحت فشار نواحی از هسته که کمانش موضعی کرده بودند به مکانیزم مقید کننده در برابر کمانش فشار بیاورند و این قسمت ها نیز تحت خمش و فشار دچار کمانش شوند. همانطور که در شکل (۲-۳۶) مشاهده میشود برای سایر نمونه ها فواصل پیچها کمتر شد و در نمونه ی S1-۲ یک ورق پرکننده ی اضافی به ضخامت ۱,۵۹ میلی متر در انتهایی مهاربند و ناحیه ی انتقالی مورد استفاده قرار گرفت تا پتانسیل کمانش موضعی را فقط به نواحی هسته محدود کند، ولی علی رغم اصلاحات انجام گرفته آزمایش نمونه ی S1-۲ در Δy۵ متوقف شد، علت توقف آزمایش مقاومت فزاینده ی فشاری مهاربند طی چرخه های تست شده بود که به تدریج به علت اصطکاک بالای بین هسته و مکانیزم مفید کننده در حال افزایش بود.



شکل (۲-۳۸) پاسخ بار تغییر مکان نمونه های C1 - 1 (a)، C2 - 1 (b)،S1-1(C)،S1-2(d)،S2-1(e)، S2-2(f) اجرای اولS2-2(g)،اجرای دومHSS(h) [۱۹]

با باز کردن نمونه ی مذکور و مشاهده ی وضعیت هسته (شکل ۲-۳۹) مشاهده گردید که کمانش های موضعی هسته که بیشتر در دو انتهای آن ایجاد شده بودند، موجب ایجاد اصطکاک بالا در این قسمت ها شده بود. اثر دیگر این پدیده، متمرکز شدن و انباشتگی تغییر شکل های پلاستیک فشاری در دو انتهای هسته مهاربند بود که خود باعث می شد در کشش این تمرکز و تجمع در نواحی میانی هسته اتفاق بیفتد.



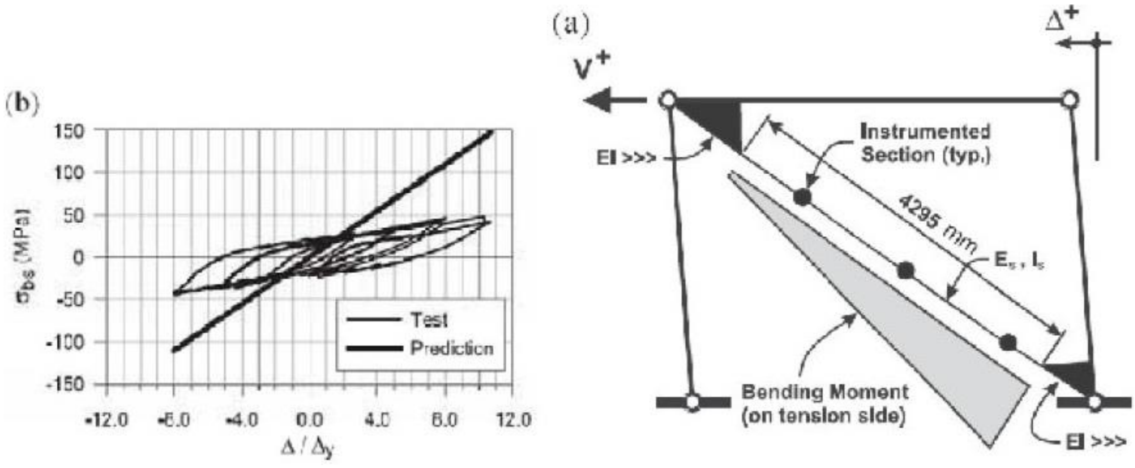
شکل (۲-۳۹) تغییر شکل باقیمانده در هسته[۱۹]

همانطور که در شکل (۲-۳۶) نشان داده شده است، در نمونه ۱-S2 از ورق های پرکننده نازک تری استفاده شده است تا کمانش های موضعی محدودتر گردند و بنابراین توزیع پلاستیسیته یکنواخت تری در هسته فولادی بدست بیاد. طول کوتاهتر در این نمونه نسبت به نمونه های ۱- S1 و۲ - S1 موجب کاهش اثرات اصطکاک بین هسته و مکانیزم مقید کننده می شد که می توانست پتانسیل مقاومت فزاینده ی فشاری را حذف کند. نمونه تحت پروتکل بارگذاری H1 قرار گرفت تا بتوان نتایج آن را با نتایج بدست آمده از تست نمونه ی $C2 - 1$ که دارای طول تسلیم شونده ی مشابهی بود کنترل کرد. هر دو مهاربند تا سیکل دوم در $7.5\Delta_{by}$رفتار تقریبا یکسانی داشتند، ولی در این سیکل و در پارگی در هسته ی تسلیم شونده در نمونه ی 1 - S2 اتفاق افتاد. بررسی شکل کمانش یافته هسته پس از اتمام آزمایش و نتایج اندازه گیری های ابعاد تغییر شکل یافته ی آن، مشخص کرد که تجمع پلاستیسیته یکسانی با آنچه در نمونه های ۱- S1 و۲ - S1 مشاهده شده بود، اتفاق افتاده است، بنابراین گسیختگی زود هنگام به علت تجمع کرنش های کششی در یک ناحیه ی کوچک هسته (ناحیه میانی ایجاد شد، هسته مهاربندهای ۱- C1 و۲ - C1 پس از آزمایش قابل مشاهده نبودند ولی می توان پیش بینی کرد که به دلیل حضور مصالح جدا کننده (دور پیچ های پلی اتیلن) اصطکاک کنترل و همچنین توزیع کرنشی یکنواختی در هسته فراهم شد.

- پاسخ خمشی داخل صفحه

نمونه های مهاربندها بوسیله پیچ به ورق های گاست ۱۹ میلی متری که به صورت دوبل به کار گرفته شده اند، متصل شد و این ورق نیز بوسیله اتصال جوشی به تیر و ستون وصل شد. بنابراین در تمامی نمونه های اتصال مهاربند- تیر و مهاربند - ستون در درون صفحه قاب به صورت صلب عمل می کرد که موجب اعمال تقاضای خمشی به مهاربند، تحت تغییر شکل های جانبی قاب می شد.

در مورد پاسخ خمشی داخل صفحه ی مهاربند، مدل تحلیلی با فرض صلب بودن ناحیه ی اتصال و گاست و در نظر گرفتن سختی خمشی غلاف فلزی برای المان مهاربند ارائه شده است. میزان تنش خمشی داخل صفحه در المان مطابق شکل (۲-۴۰) بدست می آید.



شکل (۲-۴۰) پاسخ خمشی مهاربند داخل صفحه(راست)مقایسه بین تنش های خمشی پیش بینی شده و اندازه گیری شده(چپ) [۱۹]

در مقایسه ی میزان تنش خمشی در مدل تحلیلی و آزمایشات ملاحظه می شود، تا زمانی که تنشهای محوری در المان هسته در حد الاستیک و خطی است، میزان شیب دو منحنی یکسان است و مدل تحلیلی به خوبی رفتار سیستم را پیش بینی می کند، ولی به محض جاری شدن المان هسته در کشش یا فشار میزان تنش بوجود آمده در غلاف به میزان ۲۵٪ تا ۳۰٪ حالت الاستیک کاهش می یابد که این مقدار تاثیر چندانی در رفتار و عملکرد مهاربندها نداشته است. نتایج حاصله منطبق بر نتایج مطالعه ی

سائکی[۱] نیز بود که در سال ۱۹۹۶ نشان داد پاسخ چرخه ای غیر خطی مهاربندهای مفید در برابر کمانش توسط این لنگر خمشی ثانویه متأثر نمی شود[23].

آنچه در این تحقیق روشن است این است که عدم استفاده از مصالحی برای کم کردن اصطکاک بین هسته و غلاف (به خصوص مهاربندهای مفید در برابر کمانش تمام فلزی)، استفاده از فضای خالی بین هسته و غلاف را ناگزیر می سازد. وجود این فضای خالی کمانش های موضعی محتمل هسته را در پی خواهد داشت. در نواحی تماس هسته کمانش یافته و غلاف فولادی اصطکاک فولاد بر فولاد موجبات تجمع کرنش های بالا را فراهم می آورد که طی چرخه هایی محدود گسیختگی های محتمل زود هنگام قابل پیش بینی است. بنابراین استفاده از مصالحی جهت کم کردن اصطکاک بین دو هسته فولادی و غلاف به خصوص در مهاربندهای تمام فلزی مقید در برابر کمانش به نظر می رسد.

بنابراین اگر بتوان با استفاده از مصالح جداکننده به گونه ای کرنش یکنواخت در طول هسته فولادی مهاربند ایجاد نمود، می توان انتظار داشت که تا حدود کرنشی بالایی عملکرد مطلوب در هسته مهاربندی مشاهده شود. این پدیده ایده ی کاهش طول تسلیم شونده در مهاربندهای مقید در برابر کمانش را مطرح می کند.

۲-۱۰-۷- تحقیقات رضوی و همکاران

در سال ۲۰۱۸ رضوی و همکاران [24] به منظور حذف غلاف فولادی و ایجاد یک مهاربند سبک و کارامدتر ایده استفاده از لایه CFRP[۲] را پیشنهاد نمودند. بدین منظور آنها ۲ نمونه را تحت آزمایش های تک محوری در سطوح زلزله مختلف قرار دادند و عملکرد نمونه ها را ارزیابی نمودند. نتایج این

---

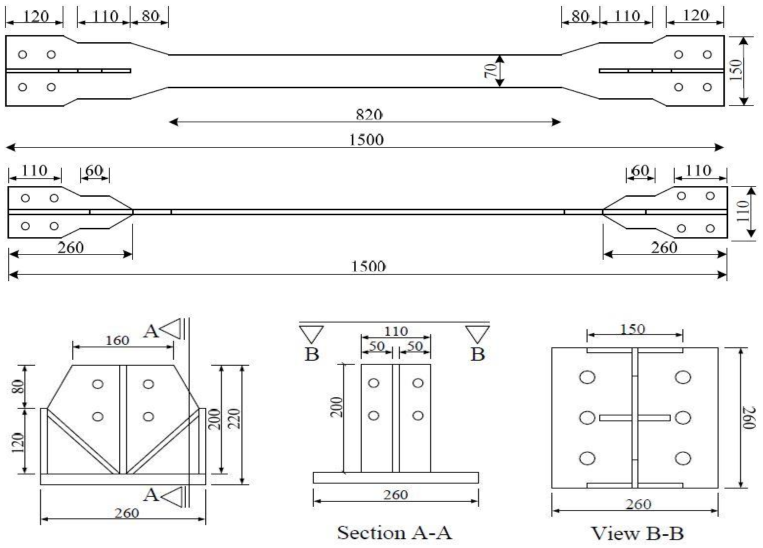
[۱] Saeki

[۲] Carbon Fiber Reinforcement Polymer

پژوهش بیان می کند که لایه های CFRP می تواند به طور موثری عملکرد مورد انتظار از غلاف را برآورده می نماید.

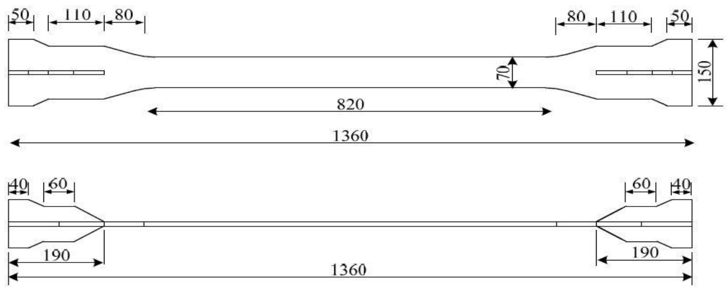
نمونه ها متشکل از هسته فولادی و ۲ عدد بلوک CFRP پیش ساخته که به صورت ساندویج هسته را در برگرفته ساخته شده اند. مصالح FRP معمولا مقاومت بیشتری نسبت به وزنشان در مقایسه با فولاد دارند. نمونه های ساخته شده برای تست در تمامی جزئیات شبیه یکدیگرند و فقط در پروتکل بارگذاری ،اتصالات انتهایی و خصوصیات CFRF فرق دارند.

هسته از فولاد ST 37-2 با مقاومت تسلیم ۲۴۸ و مقاومت نهایی ۴۰۲ مگا پاسکال به ابعاد ۷۰*۱۰ میلیمتر مربع ساخته شده است. جزئیات هسته و اتصالات انتهایی آن برای نمونه ۱ در شکل (۲-۴۱) نشان داده شده است.



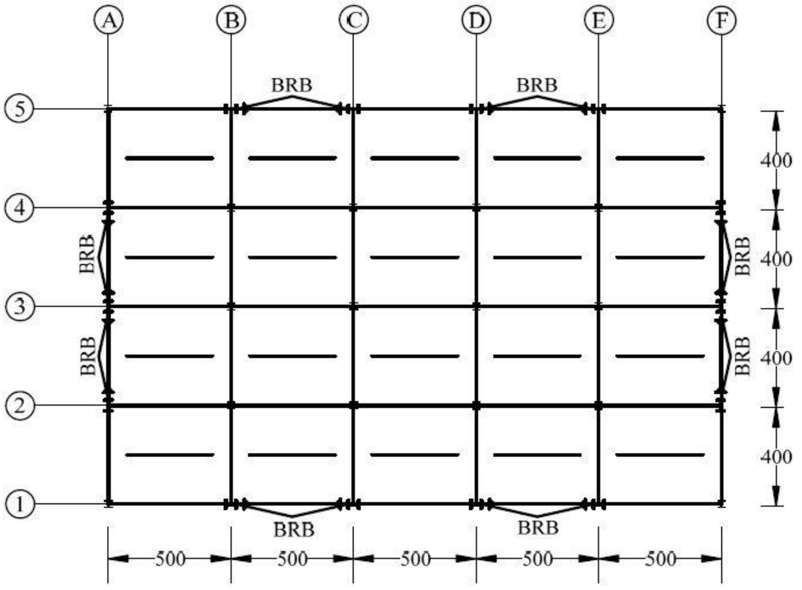
شکل (۲-۴۱) جزئیات هسته و غلاف نمونه ۱[۲۴]

همچنین مشخصات هسته نمونه ۲ نیز در شکل (۲-۴۲) نشان داده شده است.



شکل (۲-۴۲) جزئیات هسته نمونه ۲[۲۴]

به منظور ارزیابی عملکرد CFRP-BRB به صورت آزمایشی ، یک مهاربند از یک ساختمان طراحی شده انتخاب شده است تا جزئیات بندی و ساخته شود. خصوصیات و جزئیات طراحی ساختمان در شکل (۲-۴۳) نشان داده شده است.



شکل (۲-۴۳) پلان ساختمان ۶ طبقه شامل مهاربندBRB [۲۴]

طرح یک ساختمان مسکونی شش طبقه در شکل ۴ نشان داده شده است. این بنا دارای پنج دهانه ۵ متر در جهت X و چهار دهانه ۴ متر در جهت Y است. ارتفاع تمام طبقه ها ۳,۲ متر است. سیستم

مقاومت جانبی سازه در هر دو جهت BRB باالگوی شورون معکوس است. موقعیت مهاربند در طرح ساختمان در شکل (۲-۴۳) نشان داده شده است.

پارامترهای لرزه ای ارائه شده توسط استاندارد ASCE 7 (۲۰۱۰) برای تخمین بار لرزه ای استفاده می شوند. ساختمان در کلاس سایت C و طبقه لرزه ای D قرار دارد. فاکتور اصلاح پاسخ (R) از ۸ ، اضافه مقاومت از ۲,۵ و ضریب تقویت جابجایی (Cd) از ۵ انتخاب شده اند. سازه طبق AISC 341 طراحی شده است (۲۰۱۰) و نتایج طراحی در جهت X در جدول (۲-۳) ارائه شده است.

جدول (۲-۳) جزئیات طراحی نمونه ۱[۲۴]

Criteria	Unit	Demand	Capacity	Layer orientation	Number of layers	D/C
Global stability of the brace	kN	386.99	2522.87	Longitudinal	3	0.15
Global bending about weak axis of core	kN-m	5.06	13.34	Longitudinal	3	0.38
Global bending about strong axis of core	kN-m	5.06	13.69	Longitudinal	3	0.37
Clamping force	kN	30.78	116.59	Transverse	3	0.26
Local transverse strut and tie action	kN	13.47	58.29	Transverse	3	0.23

نتایج حاصل از آزمایش ها به شرح ذیل می باشد:

۱. لایه های CFRP به طور موثر هسته فولادی و بلوک های بتنی پیش ساخته را در بر گرفته است به گونه ایکه از کمانش کلی و موضعی هسته جلو گیری به عمل آورده است.

۲. عملکرد نمونه ۱ نشان داد که تا کرنش های ۳,۵٪ که متناظر با زلزله سطح DBE[۱] می باشد به خوبی می تواند پروتکل بارگذاری استاندارد را اقناع کند.

۳. در سطوح زلزله بزرگتر از DBE هنگامیکه کرنش ها به مقادیر ۵٪ یا بیشتر نزدیک می شوند احتمال رخداد پدیده خرابی خستگی کم سیکلی بسیار شایع بوده و نیازمند در نظر گرفتن راه کار مناسب در امر طراحی خواهد بود.

[۱] Design Base Earthquake

۴. طراحی BRB در سطح زلزله MCE[1] نیازمند پذیرش حجم بیشتری از فاکتور انطباق برای مولفه های خارجی هسته در BRBs ودیگر اعضای کنترل شونده تحت نیرو(FC) دارد.

۵. استفاده از فیبرهای فولادی در بتن مخلوط غلاف می تواند عملکرد لرزه ای آن را بالا برده و به طور کلی اعمال CFRP برروی بتن پیش تنیده می تواند مزایای داشته باشد و همچنین در BRBs که دارای حساسیت نسبی هستند به کار رود.

[1] Maximum considered earthquake

فصل ۳:

مدل سازی اجزا محدود

۳-۱- مقدمه

در این تحقیق مدل آزمایشـــگاهی اریاشـــار ورضـــوی برای صـــحت‌ســـنجی نتایج آنالیز عددی و نتایج آزمایشگاهی انتخاب شده است.

مدل‌ها در این تحقیق بر اساس ابعاد هندسی و نتایج آزمایشگاهی است.

در این فصـــل، نحوه مدل‌ســـازی مهاربند کمانش تاب با طول کوتاه اعم از انتخاب المان‌ها، بارگذاری، شرایط مرزی، شبکه‌بندی اجزای محدود و... شرح داده خواهد شد.

۳-۲- معرفی نرم افزار آباکوس[25]

امروزه با توســـعه روز افزون قابلیت های نرم افزارهای محاســـبات مهندســـی، این نرم افزارها تقریبا در تمامی کمپانی ها و شرکت‌هایی که محصولات صنعتی تولید می نمایند، چه پیش از ساخت محصول و چه در فرآیند تو سعه آن، به منظور شبیه سازی عملکرد مح صول مورد ا ستفاده قرار می گیرند. این شبیه سازی ها در واحدهایی به نام محاسبات مهندسی و یا مهندسی به کمک کامپیوتر (Computer Aided Engineering یا به اختصـــار CAE) انجام می شـــود. شـــبیه‌ســـازی محصـــول با کاهش تعداد آزمایش هایی که بر روی نمونه ها انجام می شود، سبب کاهش هزینه تولید و تو سعه مح صول نهایی می شود.

تقریبا تمامی دســـتگاه ها، ادوات، ماشـــین ها و وســـایل اطراف ما دارای برهم کنش های مکانیکی با محیط اطراف خود و حتی بین اجزای درونی خودشـــان هســـتند. شـــبیه ســـازی پدیده ها و برهم کنش های مکانیکی نظیر انتقال حرارت و چگونگی توزیع دما، میزان تحمل در برابر بار های ضـــربه ای،

سایش، خستگی و پاسخ سازه به تحریک های متناوب که در این محصولات روی می دهد، سبب پیش بینی عملکرد آنها در شـــرایط مختلف می شـــود. دراین خصـــوص شـــرکت Simulia نرم افزاری با نام Abaqus FEA را ارا ئه می دهد که می تواند در محیط های صـــنعتی و آکادمیک، افرادی را که می خواهند به کمک تکنیک المان محدود پدیده های متنوع مکانیکی را شبیه سازی کنند، یاری نماید.

نرم افزار Abaqus FEA (که در گذشـــته ABAQUS نام داشـــت)، یک نرم افزار تجاری برای تحلیل المان محدود و مهندسی به کمک کامپیوتر (Computer Aeided Engineering) است که در ابتدا در ســال ۱۹۷۸ به منظور حل یک مســاله المان محدود، به زبان فورترن در ۱۵۰۰۰ خط نوشــته شــد. در سال ۲۰۰۵ آباکوس توسط شرکت Dassault Systemes خریداری گردید و نشان SIMULIA با هدف دارا بودن تمام نرم افزار ها و محصــولات شــبیه ســازی این شــرکت مانند آباکوس و کتیا (CATIA) تاســیس شــد. اســم و لگوی نرم افزار اباکوس بر اســاس چرتکه (abacus) اســت که در گذشــته برای محاسبه مورد استفاده قرار می گرفته است.

نرم افزار آباکوس (ABAQUS) از جمله نرم افزاری های قدرتمند مهندســـی به کمک رایانه در زمینه تحلیل به روش اجزاء محدود (FEM) در بازار است. اسم و نشان این نرم افزار از لغت abacus در زبان انگلیسی به معنای چرتکه گرفته شده است. این نرم افزار محصول شرکت فرانسوی داسو سیستمز می با شد. ایده ا صلی نرم افزار در تز دکترای دیوید هبیت[1] در سال ۱۹۷۲ میلادی، تحت عنوان «مکانیک محاســباتی بر پایه روش اجزای محدود» در دانشــگاه براون ارایه شــد. در ســال ۱۹۷۸ آقای Hibitt به همراه ۲ شریک خود Karlsson و Sorenson شرکت HKS را تاسیس کردند و اولین ویرایش آباکوس را منتشــر ســاختند. در ســال ۱۹۹۱ شــرکت HKS حلگر ABAQUS/Explicit را هم به مجموعه نرم افزار اضافه کرد و نرم افزار اصلی خود را منتشر ساخت. سرانجام در سال ۱۹۹۹ اولین نسخه گرافیکی

[1] David Hibbitt

تحت عنوان ABAQUS/CAE به بازار عرضه شد. اولین نسخه گرافیکی ABAQUS 6.3 بود که شامل ۹ ماژول برای مدلسازی، حل و استخراج نتایج بود.

۳-۲-۱- بخش‌های پردازش نرم‌افزار

تمامی نرم‌افزارهای اجزای محدود تراز اول از سه بخش حیاتی تشکیل شده اند:

- بخش پیش‌پردازش یا مدلسازی که وظیفه آماده سازی مدل مورد نظر برای تحلیل اجزای محدود را دارد.
- بخش پردازش یا تحلیل اجزای محدود که قلب نرم‌افزار بوده و مجموعه حلگرهای مورد نیاز در تحلیل اجزای محدود را فراهم می آورد.
- بخش پس پردازش که وظیفه ارائه نتایج در قالب ابزارهای گرافیکی و نمودارها را داشته و خروجی مورد نیاز تحلیلگران را آماده می نماید.

آباکوس دارای ۵ هسته نرم افزاری اصلی است که در ادامه به طور مختصر توضیح داده شده اند.

❖ Abaqus/CAE

یا همان Complete Abaqus Enviroment (که برخی اشتباها آن را Computer Aided Engineering تصور می کنند) که از آن برای مدل‌سازی اجزای مکانیکی و مجموعه های مونتاژی (assembly) و نشان دادن نتایج تحلیل المان محدود استفاده می شود. این نرم افزار از ۱۱ ماژول (module) مختلف تشکیل شده است که در هر یک بخشی از فرآیند شبیه سازی انجام می شود. این ماژول ها همانند یک سری محیط‌های به هم پیوسته هستند که می توان به راحتی از یکی به دیگری رفت. در حقیقت با داشتن این ماژول ها در کنار هم، abaqus/CAE دارای ظرفیت پیش پردازش، پس پردازش و مشاهده فرایند حلی که توسط حلگر انجام می شود، می باشد هر چند که بخشی از مرحله

اول که مربوط به ایجاد هندسه در نرم افزار است، می تواند توسط نرم افزار های CAD[۱] متداول نیز انجام شود. در این صورت می بایست در ابتدا مدل CAD با پسوند مناسب save شده، سپس به داخل محیط CAE در ماژول part درون ریزی شود. در کنار این محصول، Abaqus/Standard، Abaqus/Explicit، Abaqus/CFD و Abaqus/Electromagnetic به منظور انجام مرحله پردازش یا حل المان محدود توسعه داده شده اند.

❖ Abaqus/Standard

یکی از حلگر های چند منظوره آباکوس است که از روش های سنتی انتگرال گیری غیر صریح به منظور حل مسایلی نظیر مسایل استاتیکی، شبه استاتیکی، کمانش و پس کمانش، تحلیل های مودال (mode based analysis)، انتقال حرارت و مسایل دینامیکی استفاده می کند. این حلگر قابلیت انجام هر دو نوع تحلیل های خطی و غیرخطی را دارد.

❖ Abaqus/Explicit

از دیگر حلگر های چند منظوره آباکوس با هدفی خاص است که از روش های انتگرال گیری صریح برای حل مسایل با درجه غیر خطی بالا که می توانند در خود دارای اندرکنش های تماسی پیچیده و بارهای گذرا باشند، استفاده می کند. در این خصوص می توان به شبیه سازی آزمایش شوک، تصادف و فرآیند های ساخت مثل ماشین کاری، برخی از مسایل کوپل سازه و سیال نظیر sloshing اشاره نمود. انتخاب حلگر مناسب میان Abaqus/Standard و Abaqus/Explicit نیازمند آگاهی از روش حل مساله در این دو حلگر است. استفاده از انتگرال گیری صریح در تحلیل المان محدود، این حلگر را قادر می سازد تا بتواند مسایل شبه استاتیکی که به دلایلی مثل پیچیده بودن اندرکنش های تماسی، Abaqus/Standard را از حل آنها عاجز می سازد، با دقت قابل قبولی حل نماید. همچنین این حلگر می تواند مسایل شامل آسیب مانند مساله برخورد گلوله به زره را به راحتی حل کند.

[۱] Computer Aided Design

❖ Abaqus/CFD

یک حلگر دینامیک سیالات محا سباتی (CFD) ا ست که قابلیت انجام تحلیل های دینامیک سیالات محاســباتی پیشــرفته را فراهم می کند. این نرم افزار به منظور انجام عملیات پیش و پس پردازش، از قابلیت های محیط CAE بهره می برد. با اضــافه شــدن این حلگر به مجموعه حلگر ها، آباکوس قادر است مسایل پیچیده کوپل سازه و سیالی (FSI) را تحلیل نماید. در اینگونه مسایل استفاده از تکنیک المان محدود برای حل میدان سیال دارای دقت کافی نبوده و استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی اجتناب ناپذیر است.

❖ Abaqus/Electromagnetic

یک حلگر الکترومغناطیس محاسباتی است که می تواند مسایل پیشرفته الکترومغناطیس محاسباتی را حل نماید. از این جمله می توان به محا سبه عددی میدان مغناطی سی در ه سته سیم پیچ ها ا شاره نمود.

۳-۲-۲- المان ها در آباکوس

با توجه به مهم بودن نوع تکنیک شبکه بندی و نیز نوع المان مورداستفاده، کاربر می‌بایست اطلاعات بیشــتری درزمینه المان‌ها داشــته باشــد. طیف وســیعی از المان‌ها در آباکوس قابل‌اســتفاده اســت که ازاین‌جهت توانایی بسیار زیادی را به کاربر می‌دهد تا بتواند انواع مختلف مسائل را مدل کرده و تحلیل نماید. در ادامه پنج ویژگی یک المان که رفتار آن را معین می‌سازند نام‌برده شده‌اند.

- نوع المان
- درجات آزادی
- تعداد گره‌ها
- روش فرمول‌بندی
- روش انتگرال‌گیری

- روش انتگرال‌گیری

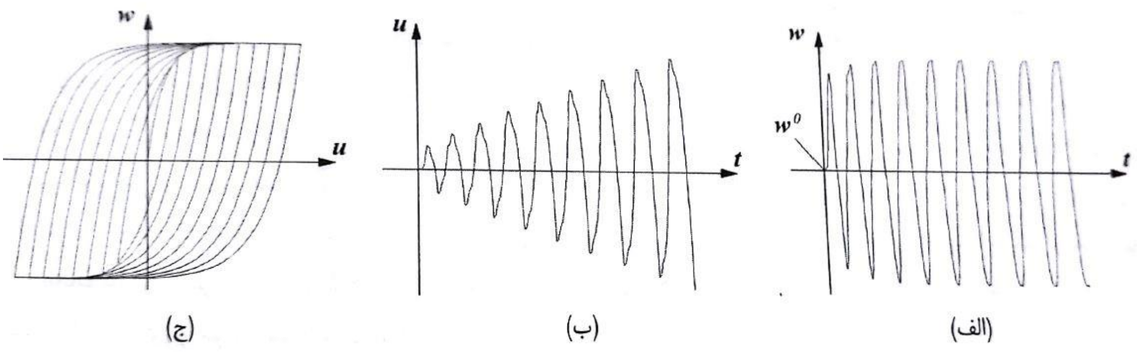
۳-۳- معرفی نمودار هیسترزیس

سیستم های سازه ای اغلب رفتار غیر خطی در برابر تحریکات طبیعی مانند زلزله از خود نشان می دهند. در این شرایط تحت نیروهای بازگشتی، سازه ها رفتار هیسترتیک قابل توجهی را از خود نشان می دهند. ماهیت طبیعی این نیروهای غیرخطی را نمی توان با تغییر مکان و سرعت در نظر گرفت. بر این اساس مدل های مختلفی از حل معادلات دیفرانسیل، که نیروهای هیسترتیک را با توجه به وابسته بودن آنها به زمان در نظر می گرفتند، به دست آمده است. در سیستم های سازهای معمولا، مدل Bouc -Wen برای لحاظ کردن رفتار هیسترتیک سازه ها، تحت نیروها در رفتار غیر خطی دینامیکی در نظر گرفته می شود. در مهندسی سازه مدل Bouc - Wen برای تشریح رفتار هیسترتیک سیستم ها به کار برده می شود. این معادلات در اوایل سال ۱۹۷۱ توسط Bouc به وجود آمد و توسط Wen در سال ۱۹۷۶ انواع مختلف آن توسعه یافت. با توجه به تنوع و گستردگی این مدل به عنوان مدلی مؤثر شناخته شده است و در مهندسی عمران، شامل سیستمهای چند درجه آزادی (MDOF) و ساختمان ها و قابها و همچنین سیستم های دو و سه بعدی پیوسته مورد استفاده قرار گرفته است. از سیستم Bouc – Wen برای بررسی رفتار میراگرها و انواع جداسازهای لرزه ای و همچنین برای مستهلک کردن نیروها در سازه های فولادی، بتنی، آجری و چوبی استفاده می شود.

۳-۳-۱- نکاتی در رسم نمودار هیسترزیس

برای ترسیم یک نمودار هیسترزیس احتیاج به دو نمودار بار - زمان مطابق شکل (۳-۱) (الف) و جابه جایی - زمان مطابق شکل (۳-۱)(ب) خواهد بود. با ترکیب این دو نمودار و حذف محور وا سطه زمان

از این دو نمودار، می توان نمودار بار - تغییرشکل را مطابق شکل (۳-۱) (ج) ترسیم کرد.



شکل (۳-۱) (الف)نمودار بار-زمان،(ب)نمودار جابجایی -زمان،(ج) نمودارهیسترزیس[۲۵]

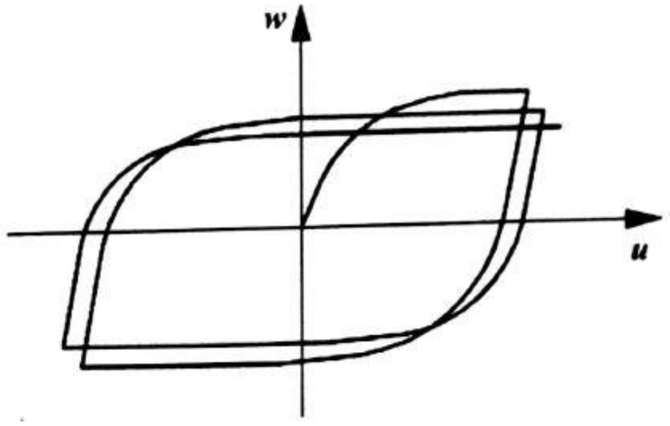
با مشاهده نمودار هیسترزیس یک سازه یا عضوی از سازه، اطلاعات زیادی در مورد آن می توان کسب کرد همان طور که ذکر شد اولین نکته، سطح زیر نمودار است که در حقیقت مقدار انرژی مستهلک شده حاصل از بارها در سازه است. هرچه این سطح بزرگتر باشد میزان شکل پذیری سازه بیشتر بوده و سازه پتانسیل بیشتری در مستهلک سازی انرژی وارده خواهد داشت. این نکته در مناطق لرزه خیز که هدف از طراحی، بیشتر کردن شکل پذیری سازه است، می تواند بسیار حائز اهمیت باشد.

تقارن در نمودار هیسترزیس نیز نشان دهنده رفتار یکسان سازه در برابر بارهای چرخه ای است و هر چه میزان این تقارن در نمودار بیشتر باشد، رفتار یکنواختی از سازه در بارهای رفت و برگشتی و مخصوصا بار زلزله که طبیعتی رفت و برگشتی دارد خواهیم داشت.

۳-۳-۲- زوال مقاومت (Strength Degradation)

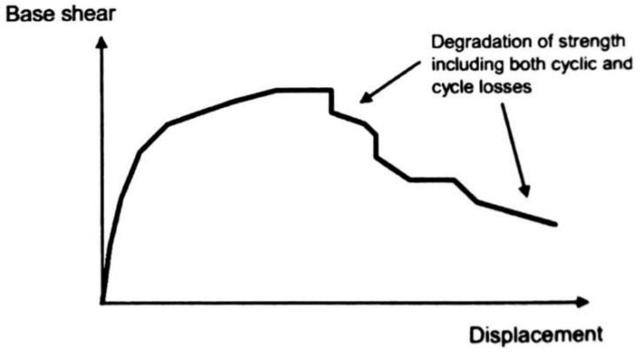
اگرارتفاع نمودار در سیکل های متوالی کاهش یابد، سازه دارای زوال مقاومت است و برعکس با زیاد شدن ارتفاع نمودار در هر سیکل (شیب ثابت) سازه دارای سخت شدگی است و در نتیجه از یک چرخه

به چرخه دیگر مقاومت سازه بیشتر خواهد شد. به شکل (۳-۲) توجه کنید.



شکل (۳-۲) زوال مقاومت[۲۵]

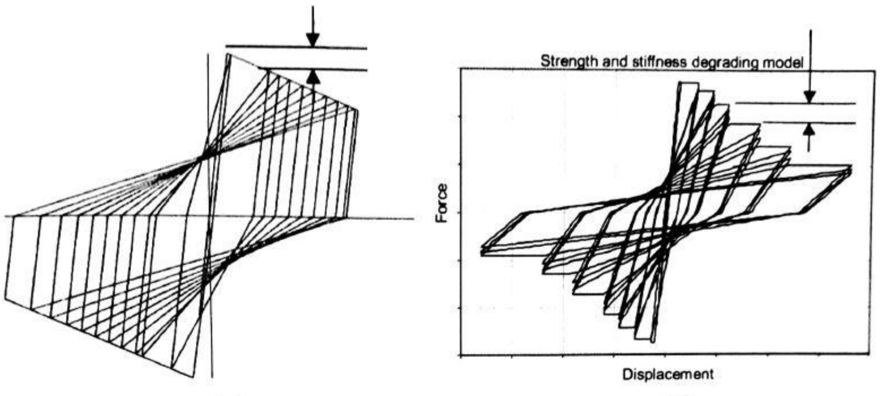
در اغلب سازه ها زوال مقاومت پیچیده است و به راحتی قابل محاسبه نیست. در شکل (۳-۳) منحنی بار افزون یک ساختمان با ارتفاع متوسط بتنی را مشاهده می نمایید. در حقیقت این نمودار نیم چرخه ای از رفتار غیر خطی سازه ا ست که در چرخه های رفت و برگ شتی تکرار شده و زوال مقاومت کلی سازه را تحت بارهای چرخه ای نشان میدهد.



شکل (۳-۳) زوال مقاومت در منحنی بار افزون ساختمان های بتنی[۲۵]

دو نوع زوال مقاومت در طول پا سخ هی سترتیک به وجود می آید. برای تفهیم بهتر مطلب شکل های (۳-۴) (الف) و (ب) را مشـاهده کنید. هر دو شـکل نشـان دهنده زوال مقاومت و سـختی هسـتند؛ در نمودار هی سترزیس الف (زوال مقاومت چرخه ای) مقاومت در طول چرخه های تغییر شکل ثابت باقی

می ماند، اما زوال مقاومت در شروع هر سیکل رخ می دهد. سختی مؤثر در هر چرخه کاهش یافته و شـــیب قســـمت های الاســـتیک در طول هر چرخه ثابت اســـت. در نمودار (ب)، زوال مقاومت برخلاف نمودار(الف) در درون چرخه رخ می دهد.بدین معنی که در هر چرخه درست در محل جاری شدن این زوال مقاومت رخ می دهد که می تواندرد اثر آسیب دیدگی المان های سازه باشد.

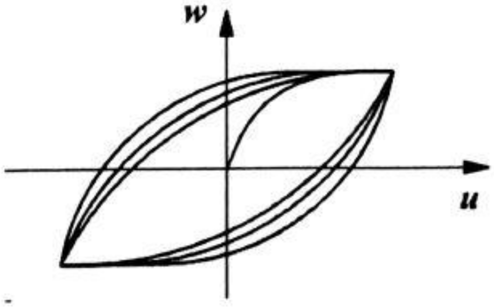


(ب) (الف)

شکل (۳-۴) (الف) زوال مقاومت چرخه ای ، (ب) زوال مقاومت درون چرخه ای[۲۵]

۳-۳-۳- زوال سختی (Stiffness degradaton)

همان طور که در مورد زوال مقاومت ذکر شد، در نمودارهای هیسترزیس هرچه شیب نمودار در چرخه های متوالی کاهش پیدا کند، در حقیقت با زوال سختی سازه مواجه هستیم. شیب نمودار بار - تغییر مکان، سختی سازه را نشان میدهد. کاهش سختی اکثرا در انواع سازه ها که در چرخه های بارگذاری طولانی قرار می گیرند رخ می دهد. برای تفهیم بهتر مطلب شکل(۳-۵) را مشاهده نمایید.

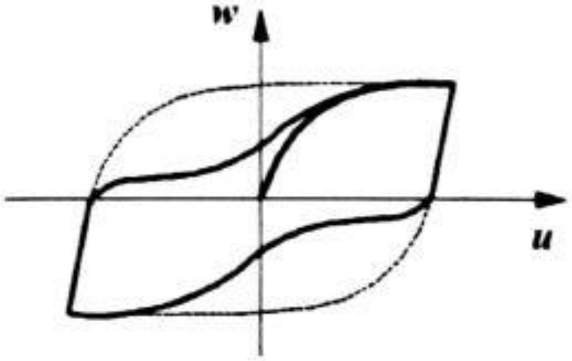


شکل (۳-۵) زوال سختی در نمودار هیسترزیس[۲۵]

۳-۳-۴- Pinching Effect

چنانچه مسیر طی شده در نمودار هیسترزیس مسیر یکنواختی نباشد، سازه دارای لغزش است که به این پدیده اصطلاحا Pinching Effect می گویند. باریک شدگی چرخه ها در وسط نمودار را Pinching می گویند و علت این رفتار در حقیقت از دست دادن سخت شدگی به صورت آنی است که اغلب، علت آن آسیب دیدن قسمتهایی از سازه، تحت تغییر شکل های بزرگ است.

ترک خوردن بتن و لیز خوردن اتصال های پیچ در سازه های فلزی و شل شدگی و لیز خوردن اتصالات (پیچ یا میخ) در سازه های چوبی از عوامل به وجود آورنده پدیده Pinching در نمودار هیسترزیس می باشند. برای تفهیم بهتر مطلب شکل (۳-۶) را مشاهده کنید.



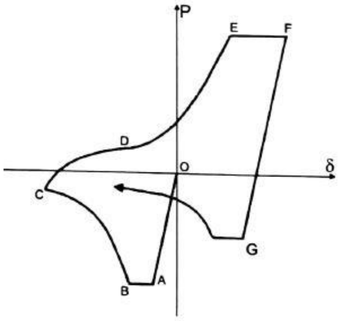
شکل (۳-۶) Pinching Effect [۲۵]

۳-۳-۵- اثر P - Delta در نمودار هیسترزیس

مقاومت جانبی سازه در طول زلزله امر بسیار جدی برای مهندسان است. مشخصه های غیرخطی هیسترتیک اکثر سازه ها با زوال مقاومت و سختی همراه است. زوال مقاومت به همراه اثر P - Delta ما را به سمت سخت شدگی پست - الاستیک سوق میدهد، که البته به نوع زوال مقاومت بستگی دارد. این اثرات ناپایداری دینامیکی در مدل سازه ایجاد می کند.

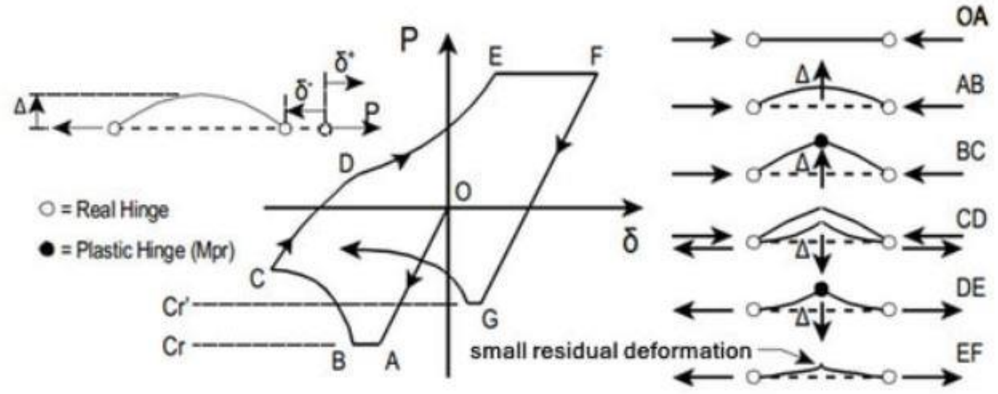
اثر کمانش در نمودار هیسترتیک سازه ها را اغلب در مدل های تحلیل رفتار مهاربندها می توان

مشاهده کرد. در شکل (۳-۷) نمودار هیستر تیک یک مهاربند CBF نشان داده شده است. بارگذاری از نقطه o شروع شده و مهاربند در فاز الاستیک در فشار قرار می گیرد. کمانش خمشی در نقطه A رخ می دهد و در این مرحله مهاربند قوس جانبی دارد. در نقطه B مفصل پلاستیک تشکیل می شود، در جایی که نیرو از حد الاستیک تجاوز می کند. در بازه BC مهاربند با زوال مقاومت و سختی درون چرخه ای همراه است و در بازه CD کاهش یافتن تغییر شکل جانبی رخ می دهد. از نقطه D تا E مهاربند وارد فاز کششی می شود و در نهایت در نقطه E به ظرفیت کامل مهاربند خواهیم رسید که تا نقطه F ثابت باقی می ماند. هنگامی که بارگذاری مجدد صورت می گیرد، تغییر شکل جانبی باقی مانده از مراحل قبل، ظرفیت فشاری مهاربند را کاهش می دهد. همان طور که مشخص است، اختلاف نیروی نقطه G و A همین اختلاف را نشان میدهد. این زوال مقاومت تحت اثر کمانش در طول بارگذاری متناوب رخ داده و شکل نمودار هیسترزیس را تحت تأثیر قرار میدهد.



شکل (۳-۷) نمودار مهاربند CBF تحت بارگذاری متناوب[۲۵]

در شکل (۳-۸) می توانید مرحله به مرحله کمانش را همزمان با ترسیم نمودار هیسترتیک آن و همچنین رفتار مهاربندCBF در فازهای مختلف و ایراد مفصل پلاستیک در بارگذاری و باربرداری، مشاهده نمایید.



شکل (۳-۸) نمودار مهاربند همراه با مراحل کمانش عضو[۲۵]

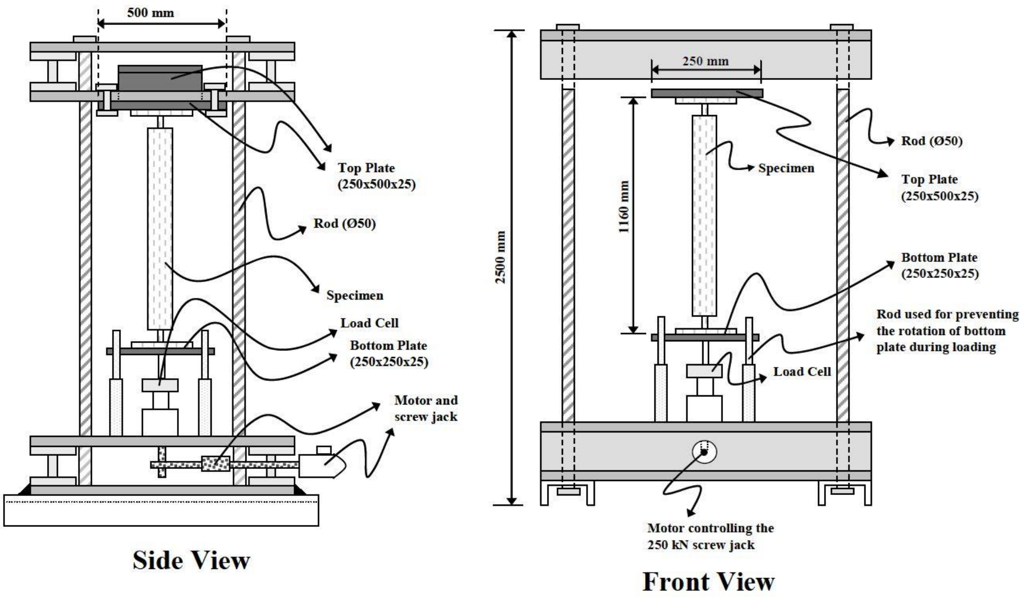
۳-۴- مدل سازی RLBRB در نرم افزار اجزا محدود آباکوس

۳-۴-۱- مشخصات مدل آزمایشگاهی ارياشار جهت صحت سنجی

در این فصـــل، نتایج عددی با نتایج دو نمونه آزمایشـــگاهی معتبر مقایســـه می‌شـــود تا صـــحت مدل‌سازی آشکار گردد. ازاین‌رو نمونه‌ی آزمایشگاهی ارياشار و رضوی انتخاب‌شده است.

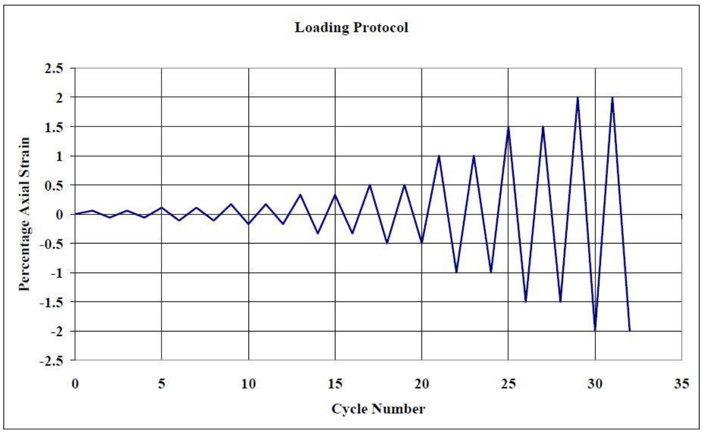
در بخش (۲-۱۰-۱) جزئیات کامل مطالعات ارياشـــار و همکارانش بیان گردید. با این حال در این پژوهش به منظور صـــحت ســـنجی مدل ســـازی اجزا محدودی یکی از نمونه های مورد مطالعه آنها را انتخاب و مورد برر سی قرار خواهیم داد. از آنجایی که مدل ۱۱ از لحاظ جزئیات ا ستفاده شده ب سیار شبیه به مدل پیشنهادی(مهاربند با هستهS شکل) است لذا در اینجا از آن استفاده می شود.

مجموعه آزمایش شـــامل یک قاب بود که به طور خاص برای این مطالعه ســـاخته شـــد شـــکل (۳-۹). بارهای ک ش شی و ف شاری تو سط یک جک ۲۵۰ کیلونیوتنی به نمونه ها اعمال شد. تمامی نمونه ها تحت پروتکل بارگذاری شبه استاتیکی افزاینده قرار گرفتند.



شکل (۳-۹) جزئیات دستگاه آزمایش[۷]

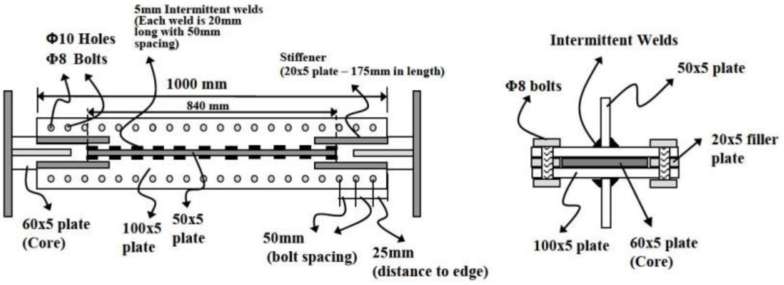
به منظور آزمایش تایید صلاحیت BRB ها آزمایش بارهای چرخه ای، پروتکل بارگذاری پیشنهاد شده آیین نامه‌ی AISC با اندکی تغییر در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است شکل (۳-۱۰).



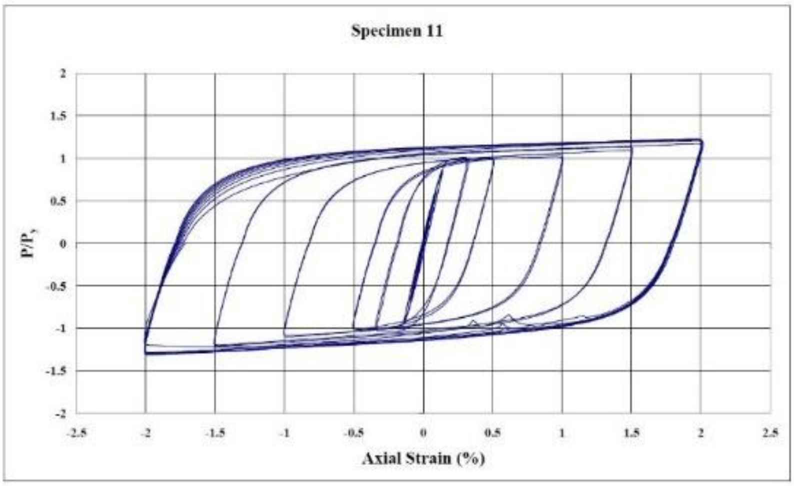
شکل (۳-۱۰) پروتکل بارگذاری استانداردAISC2005 [۷]

بخش هسته نمونه۱۱ با نمونه ۹ یکسان است. این نمونه به جای استفاده ازاتصال جوشی دارای یک مکانیزم مهار پیچ و مهره می باشد (شکل ۳-۱۱). بخش بالایی غلاف شامل یک شکل T است که با جوشکاری صفحات به ابعاد ۵*۱۰۰میلی مترمربع و ۵*۵۰ میلی مترمربع تشکیل شده است. نمونه

۱۱ رفتار هیسترتیک پایدار نشان میدهد. اختلاف بین حداکثر بارهای کششی و فشاری به ۸,۱ درصد رسیده است. برای نمونه ۷ چرخه اضافی در فشار ۲ درصد بعد از اتمام توالی بارگذاری اصلی استفاده شد. این چرخه های اضافی منجر به انعطاف پذیری تجمعی ۶۰۰ برابر تغییر شکل تسلیم شده است. رفتار این نمونه با چرخه بارگذاری اضافی در شکل (۳-۱۲) آورده شده است. در هفتمین چرخه اضافی افت بارهای جزئی تحت بارگذاری فشاری مشاهده می شود. این افت ها هیچ گونه ضرری در رفتار کلی ایجاد نمی کند. این افت های بار به دلیل مقدار زیاد کرنش های غیرالاســـتیک تجمعی کمانش های موضعی های از خود نشان داده بودند.

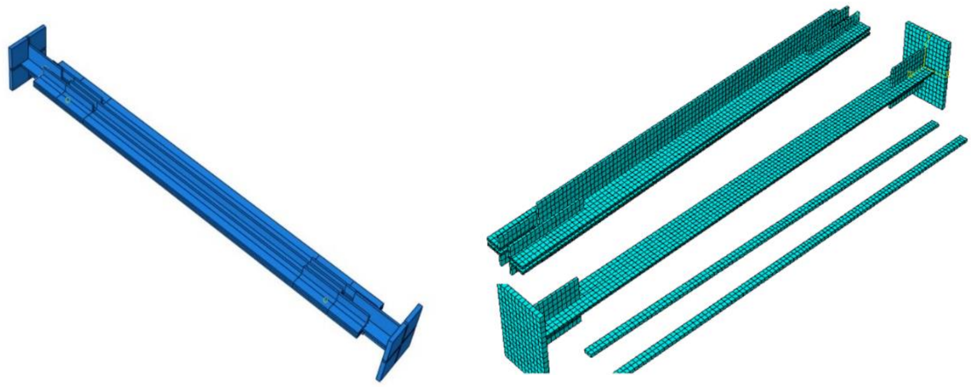


شکل (۳-۱۱) جزئیات نمونه ۱۱[۷]

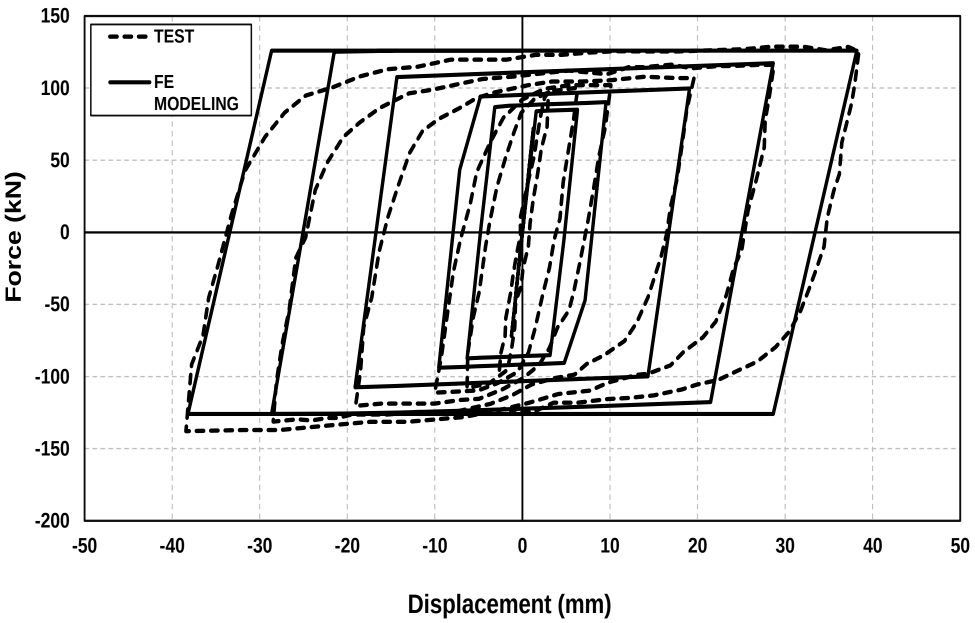


شکل (۳-۱۲) نمودار بار-تغییر مکان نمونه ۱۱[۷]

به منظور صحت سنجی مدل آزمایشگاهی مدلسازی عددی با استفاده از نرم افزارAbaqus انجام شده است. نحوه مش بندی و همچنین مونتاژ مدل در شکل (۳-۱۳) ، همچنین مقایسه نمودار هیسترزیس مدل آزمایشگاهی با تحلیل اجزا محدودی نیز در شکل (۳-۱۴) نشان داده شده است. همانطور که از مقایسه نمودارهای هیسترزیس بر می‌آید انطباق بسیار خوبی بین آنها برقرار است و این بیانگر مدل سازی صحیح در نرم افزار Abaqus است.

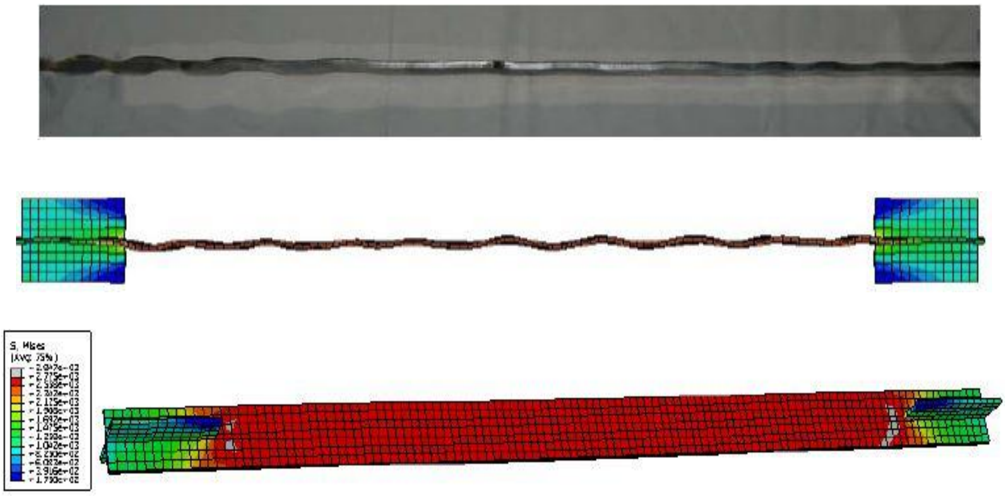


شکل (۳-۱۳) مدل مش بندی و مونتاژ شده ارپاشار



شکل (۳-۱۴) مقایسه نمودار مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی ارپاشار

همچنین نحوه کمانش موضعی هسته در مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی در آخرین چرخه بارگذاری و نحوه توزیع تنش فون میزز در شکل (۳-۱۵) نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۵) نحوه کمانش موضعی هسته در مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی

مقایسه بین مقادیر سختی برای مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی به صورت جدول(۳-۱) زیر است:

جدول (۳-۱) مقادیر سختی اولیه برای مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی

سختی فشاری		سختی کششی		
$0.66\Delta y$	$0.33\Delta y$	$0.66\Delta y$	$0.33\Delta y$	
۰.۹۶	۰.۹۴	۱.۰۳	۱.۰۷	**test11**
۱.۰۵	۱.۰۳	۱.۰۸	۱.۱	**تحلیلی ۱۱**
۹.۳۸	۹.۵۷	۴.۸۵	۲.۸	**درصد اختلاف(٪)**

همانطور که از نتایج جدول بر می آید اختلاف ناچیزی بین مقادیر حاصل از نتایج آزمایشگاهی و نتایج تحلیلی وجود دارد. اختلاف ناچیز موجود در بین مدل تحلیلی و مدل آزمایشگاهی معمولا ناشی از عدم ایجاد شرایط واقعی در نرم افزار می باشد. اما با این وجود اختلاف در حد قابل قبول است.

از نقطه نظر میزان استهلاک انرژی نیز با توجه به نمودار هیسترزیس حاصله مشاهده می شود که میزان آن در دو نمونه تقریبا یکسان می باشد. در جدول (۳-۲) نیز مقایسه بین شکل پذیری و در

جدول (۳-۳) هم مقادیر مقاومت مهاربند تحلیلی و مدل آزمایشگاهی اریاشار انجام شده است.

جدول (۳-۲) ارزیابی شکل پذیری

TEST				نمونه تحلیلی				
CYCLE	Eu(mm)	Ey(mm)	μ (شکل پذیری)	CYCLE	Eu(mm)	Ey(mm)	μ (شکل پذیری)	درصد اختلاف(٪)
0.5Δbm	۹.۹۱	۲.۸۳	۳.۵۰۱۷۶۷	0.5Δbm	۹.۷۵	۲.۵۷	۳.۷۹۳۷۷۴	۸.۳۴
Δbm	۱۹.۵۴	۲.۸۳	۶.۹۰۴۵۹۴	Δbm	۱۹.۳۱	۲.۵۷	۷.۵۱۳۶۱۹	۸.۸۲
1.5Δbm	۲۸.۹	۲.۸۳	۱۰.۲۱۲۰۱	1.5Δbm	۲۸.۶۵	۲.۵۷	۱۱.۱۴۷۸۶	۹.۱۶
2Δbm	۳۸.۳	۲.۸۳	۱۳.۵۳۳۵۷	2Δbm	۳۸.۲	۲.۵۷	۱۴.۸۶۳۸۱	۹.۸۳

جدول (۳-۳) ارزیابی مقاومت

TEST		نمونه تحلیلی	
CYCLE	Fu(kN)	Fu(kN)	درصد اختلاف(٪)
0.5Δbm	۱۱۸۹۳۷.۵۶	۱۱۲۷۹۷	۵.۴۴
Δbm	۱۲۶۵۳۳.۴	۱۲۶۹۴۳	-۰.۳۲
1.5Δbm	۱۳۰۷۲۴.۱۶	۱۲۹۸۹۷	۰.۶۴
2Δbm	۱۴۰۵۸۱.۵۶	۱۴۱۵۳۲	-۰.۶۷

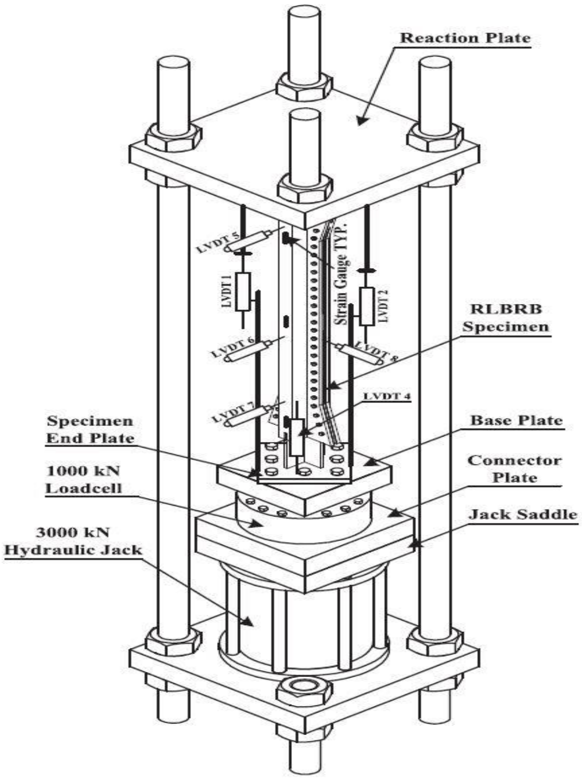
۳-۴-۲- مشخصات مدل آزمایشگاهی رضوی جهت صحت سنجی

جزئیات مدل آزمایشگاهی رضوی و همکاران در بخش(۲-۱۰-۵) ذکر گردید اما در ادامه توضیحات تکمیلی این مدل در این بخش ذکر می گردد.

بخش هسته مهاربند به علت اهمیت بالای آن بوسیله مکانیزم واترجت توسط دستگاه CNC [۱] از یک ورق یکپارچه برش خورده است. برای برش غلاف هم از مکانیزم پلاسما CNC با شدت کمتری از

[۱] Computer Numerical Control

بخش هسته استفاده شده است. بعداز ساخت تمامی بخشها در نهایت نمونه ها در دستگاه تک محوری قرار گرفته و توسط دو سری پیچ در بالا و پایین مانند شکل (۳-۱۶) به خوبی محکم شده اند.

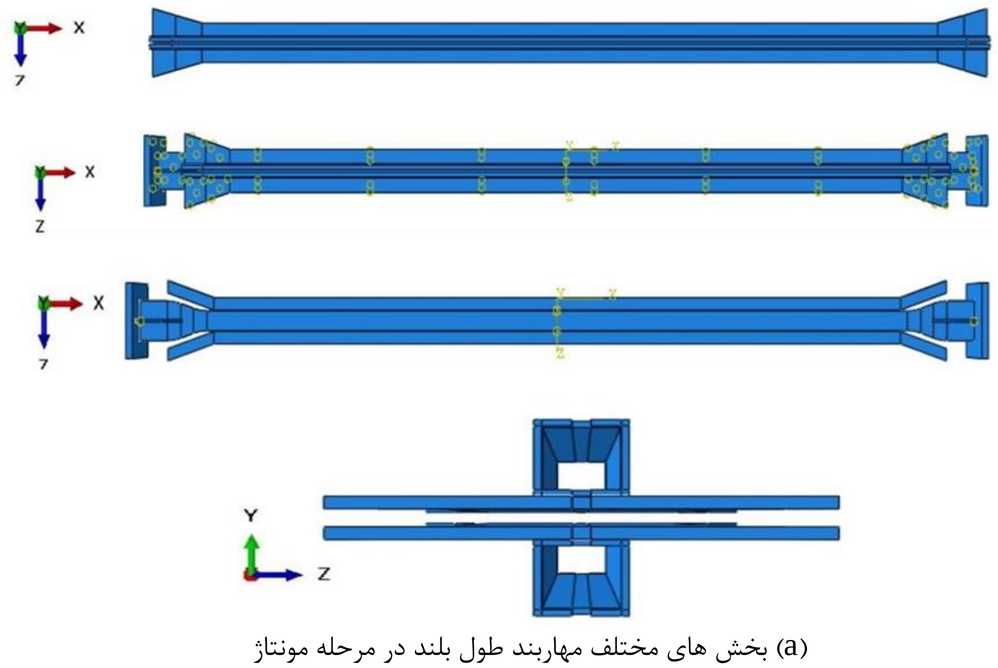


شکل (۳-۱۶) نمای سه بعدی از RLBRB در دستگاه ستاپ[۱۱]

یک آزمایش تک محوره با یک سیلندر هیدرولیک دو منظوره که قادر به اعمال فشار ۳۰۰۰ کیلو نیوتن و کشش ۱۰۰۰ کیلونیوتن است با ظرفیت بارگذاری ۱۰۰۰ کیلو نیوتن برای انجام این کار استفاده شده است. در طول آزمایش، جابجایی های محوری نسبی دو صفحه انتهایی توسط دو جابجایی متغیر خطی مورد بررسی قرار گرفتند (LVDTs) و مقدار متوسط آن به عنوان مقدار بارگذاری کنترل شده جابجایی (LVDT1 و LVDT2) در نظر گرفته شده است. علاوه بر این ، دو

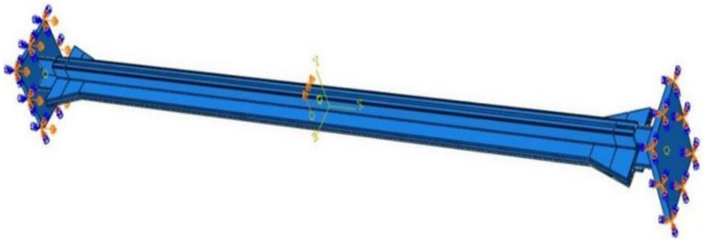
LVDT [1]دیگر فاصله بین غلاف و صفحه های انتهایی در بالا (LVDT3) و پایین(LVDT4) نمونه برای برر سی مکانیسم توقف و لغزش غلاف در نظر گرفته شده بود. سه LVDT عمود بر غلاف، به منظور کنترل پتانسیل تغییر شکل های خارج از صفحه نمونه ها دربالا، وسط و پایین نمونه (LVDT5، LVDT6 و LVDT7) قرار داده شدند.یک LVDT در قسمت میانی به منظور کنترل کمانش درن صفحه نمونه (LVDT8) ا ستفاده شد.جزئیات موقعیت قرار گیری LVDTs در شکل (۳-۱۶) ن شان داده شده است.

نحوه مش بندی و مونتاژ مدل تحلیلی در نرم افزار Abaqus در شکل (۳-۱۷)(c،a,b) نشان داده شده است. البته در این قسمت مشخصات مهاربند کمانش تاب طول بلند ابتدا ذکر می گردد و در ادامه مهاربند طول کوتاه ارائه می گردد.

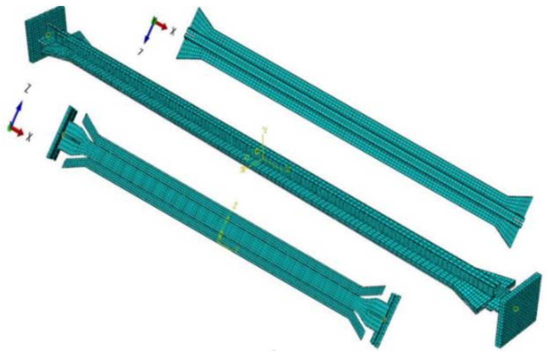


(a) بخش های مختلف مهاربند طول بلند در مرحله مونتاژ

---
[1]Linear Variable Differential Transformer



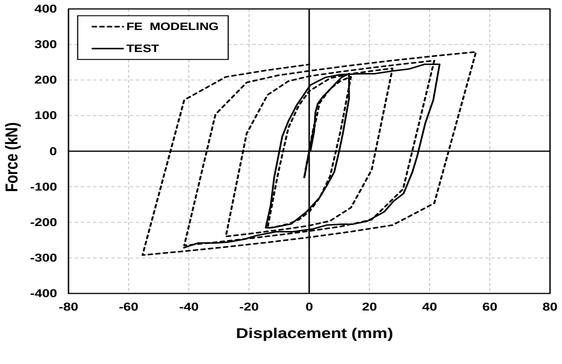
(b مدل نهایی مهاربند بعد از مونتاژ و نحوه بارگذاری و شرایط مرزی



(c جزئیات مش بندی مهاربند

شکل (۳-۱۷) جزئیات مدل سازی نمونه طول بلند

نمودار بار- تغییر مکان مهاربند کمانش تاب طول بلند در شکل (۳-۱۸) ارائه گردیده است. همانطور که در شکل مشخص است انطباق خوبی بین نمودار مدل آزمایشگاهی و مدل اجزا محدودی برقرار است.



شکل (۳-۱۸) صحت سنجی مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی در دامنه های کرنشی (۰٫۵ و ۱٫۵)

مقایسه کمی پارامترهای سختی اولیه، مقاومت و شکل پذیری برای مهاربند کمانش تاب با طول بلند و مدل آزمایشگاهی در جداول (۳-۴)،(۳-۵) و (۳-۶) ارائه شده است.

جدول (۳-۴) مقایسه میزان سختی اولیه مهاربند طول بلند و مقادیر آزمایشگاهی

TYPE	Force (kN)	Displacement (mm)	Stiffness (Kn/mm)	درصد اختلاف (٪)
TEST	۱۳۱	۲.۷۱	۴۸.۳۳۹۴۸	۳.۵
BRB	۱۳۴	۲.۸۷	۴۶.۶۸۹۹	

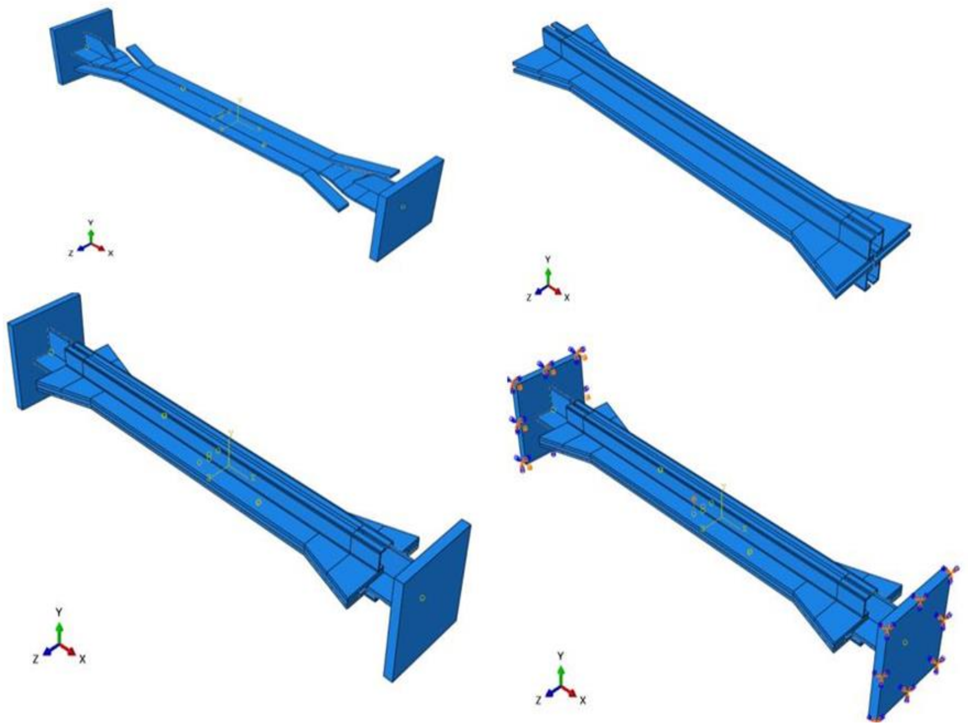
جدول (۳-۵) ارزیابی مقاومت برای مهاربند طول بلند با مدل آزمایشگاهی

	TEST	BRB	
CYCLE	Fu(kN)	Fu(kN)	درصد اختلاف
0.5Δbm	۲۲۸	۲۱۷	۵.۰۷
Δbm	۲۳۷	۲۲۵	۵.۳۳
1.5Δbm	۲۷۵	۲۶۷	۳
2Δbm	۲۸۹	۲۷۹	۳.۵۸

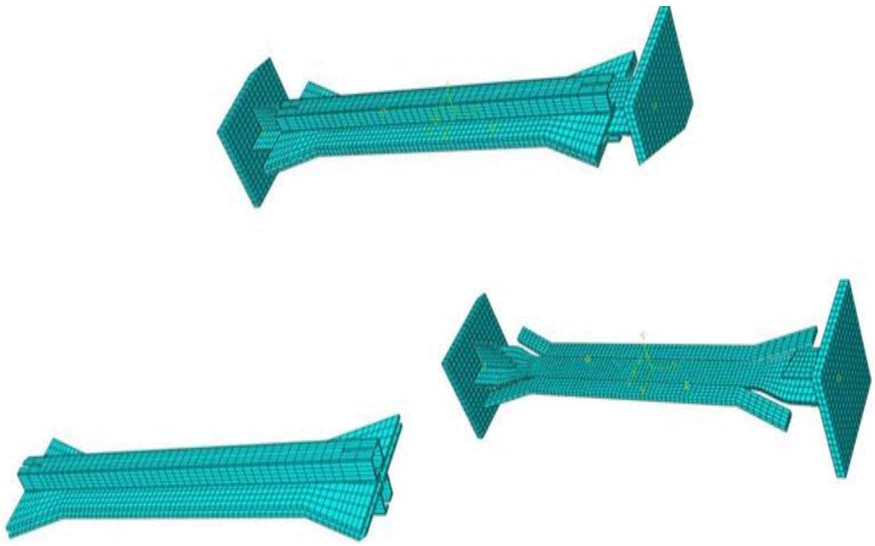
جدول (۳-۶) ارزیابی میزان شکل پذیری مهاربندBRB و مدل آزمایشگاهی

TEST				BRB				
CYCLE	EU(mm)	Ey(mm)	μ	CYCLE	EU(mm)	Ey(mm)	μ (شکل پذیری)	درصد اختلاف
2Δbm	۵۵.۴	۲.۷۳	۲۰.۲۹۳۰۴	2Δbm	۵۵.۴	۲.۹	۱۹.۱۰۳۴۴۸۳	۶.۲۳

به عنوان صحت سنجی مدل طول کوتاه، نمونه شماره ۱ مورد استفاده قرار گرفت که مشخصات آن ذکر گردید.در ادامه مشخصات مدل سازی نمونه در شکل (۳-۱۹)(a,b) و نمودار بار -تغییر مکان نمونه ۱ در کارآزمایشگاهی با تحلیل نرم افزاری مورد مقایسه قرار گرفته است همانطور که در شکل (۳-۲۰) نشان داده شده است انطباق بسیار مناسبی بین هردو برقرار است.

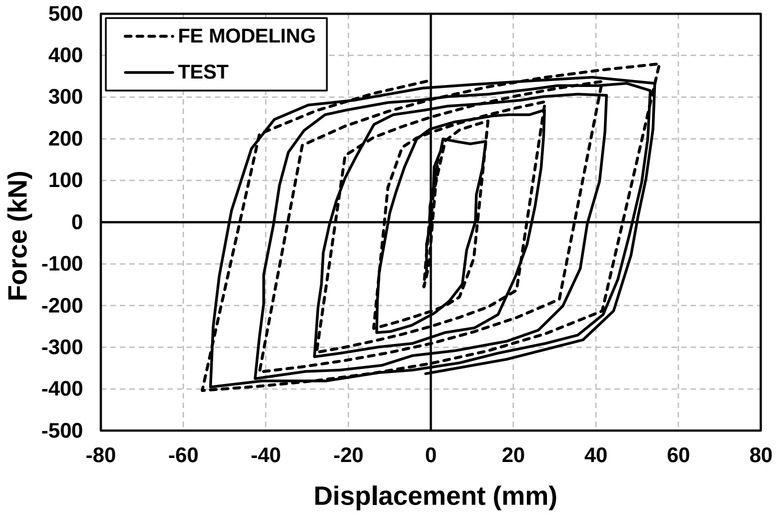


a) مدل مونتاژ شده و مدل بارگذاری شده مهاربند طول کوتاه



b) مدل مش بندی شده مهاربند طول کوتاه رضوی

شکل (۳-۱۹) مشخصات نمونه رضوی



شکل (۳-۲۰) صحت سنجی مدل آزمایشگاهی و مدل اجزا محدودی مهاربند طول کوتاه رضوی

۳-۴-۳- مدل سازی مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل

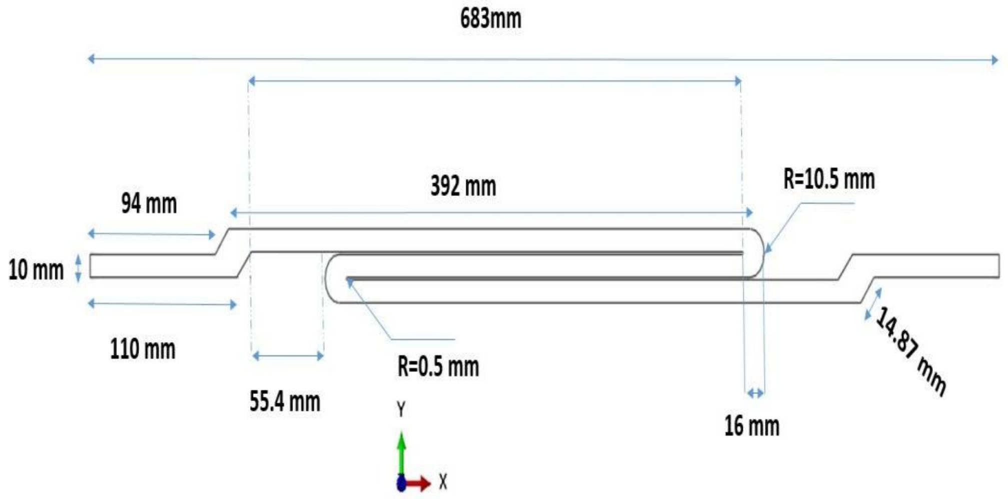
همانطور که پیشتر ذکر شد، هدف اصلی در این پژوهش معرفی و بررسی نوعی از مهاربند مقید در برابر کمانش با طول کوتاه با جزئیات جدید ا ست که در آن سعی شده برخی از م شکلات موجود در مهاربندهای مقید در برابر کمانش متداول طول کوتاه مرتفع گردد.

مهاربند پیشنهادی شامل هسته، غلاف، فیلر، ورق های انتهایی و سخت کننده است که در ادامه جزئیات هرکدام شرح داده خواهد شد.

- هسته

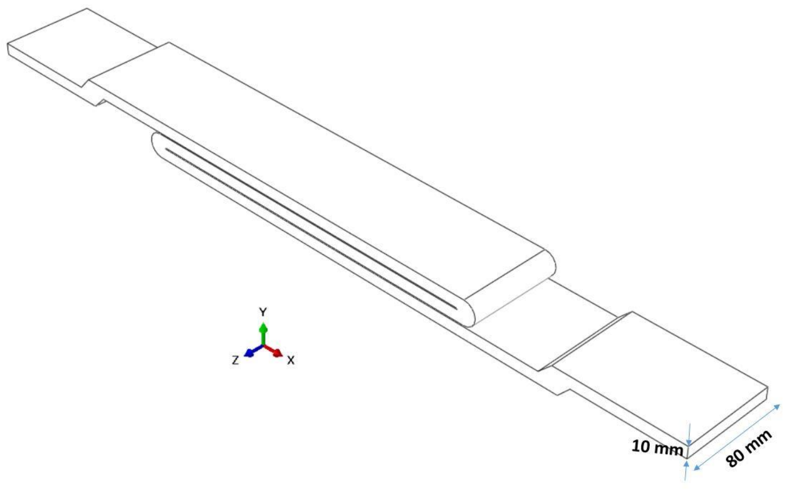
در این بخش به لحاظ داشتن معیاری برای مقایسه و صحت سنجی نتایج سعی شده که سطح مقطع هسته مهاربندS شکل برابر سطح مقطع مهاربند طول کوتاه ارائه شده توسط رضوی و همکاران باشد. از این رو ابعاد هسته برابر۱۰ * ۸۰ میلی متر مربع انتخاب گردید.جنس مصالح هسته از فولاد ST 37-2 با مقادیر تنش تسلیم Fy=248 و Fu=405 مگا پاسکال است. همچنین مقادیر ضریب پواسون و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر $\nu = 0.3$ و $E = 200GPa$ درنظر گرفته شده است. به دلیل اینکه

هسته تحت تغییر شکل های پلاستیک بالایی قرار دارد لذا بهتر است که برای این منظور از مش C3D20 استفاده گردد. نحوه تماس هسته با غلاف اصطکاکی با ضریب اصطکاک ۰,۰۱۵ است.طول کلی هسته برابر۶۸۳ میلی متر و طول ناحیه تسلیم شونده ۴۶۳ میلی متر می باشد همانطورکه در شکل(۳-۲۱) نشان داده شده است.



شکل (۳-۲۱) جزئیات هسته مهاربندطول کوتاه با هسته S شکل

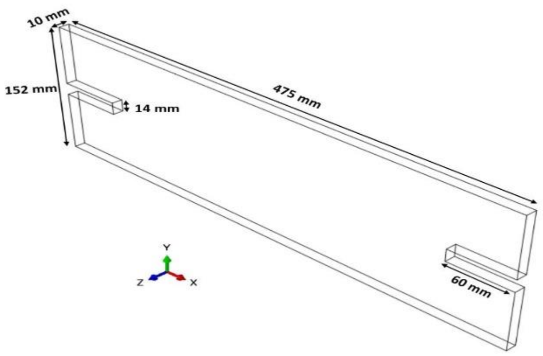
نمای از بالامهاربند طول کوتاه با هسته S شکل نیز در شکل (۳-۲۲) نشان داده شده است.



شکل (۳-۲۲) نمای از بالای مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل

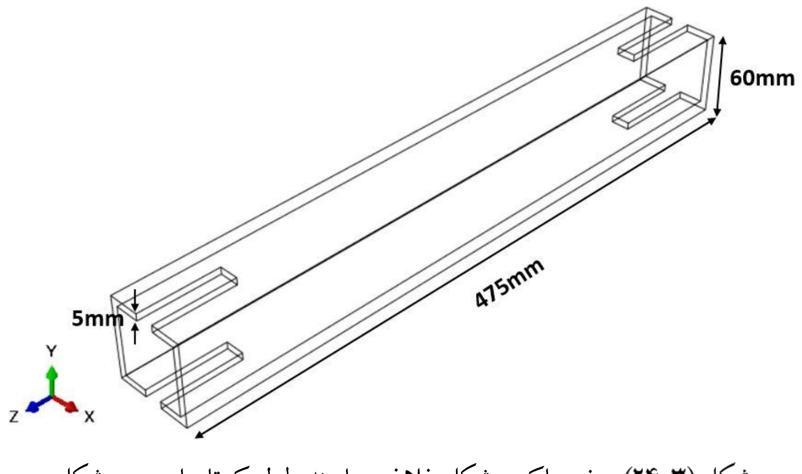
- غلاف

به منظور جلوگیری از کمانش کلی و محدود نمودن کمانش های موضعی هسته، غلاف از دو قسمت صاف و یک مقطع باکس شکل تشکیل شده است. ورق صاف به ابعاد۱۰*۱۵۲ میلی مترمربع به طول ۴۷۵ میلی متر که دو شکاف طولی به منظور تسهیل حرکت هسته با ابعاد۱۴*۶۰ میلی متر مربع برروی آن ایجاد شده است شکل (۳-۲۳).



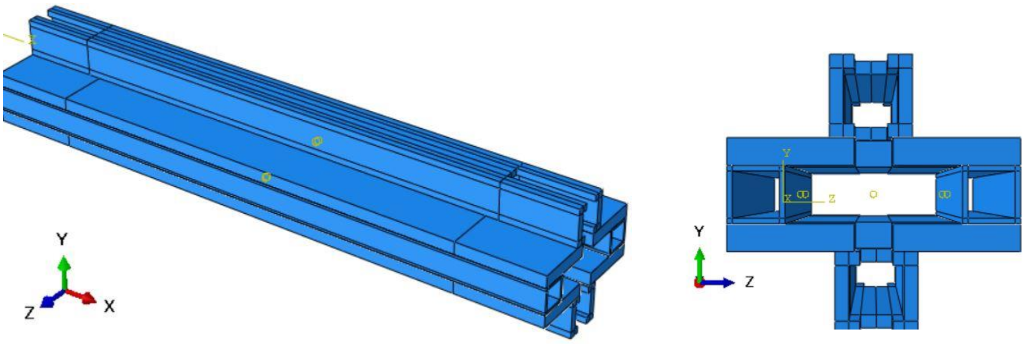
شکل (۳-۲۳) قسمت صاف غلاف مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل

جنس بخش صاف از همان مصالح هسته تشکیل گردیده است. مقطع باکس با ابعاد۶۰*۶۰ و ضخامت ۵ میلی متر و طول ۴۷۵ تشکیل گردیده است. جنس مقطع باکس از ST52 با تنش تسلیمFy= ۳۳۵ و تنش نهایی Fu=510 مگا پاسکال است شکل (۳-۲۴).

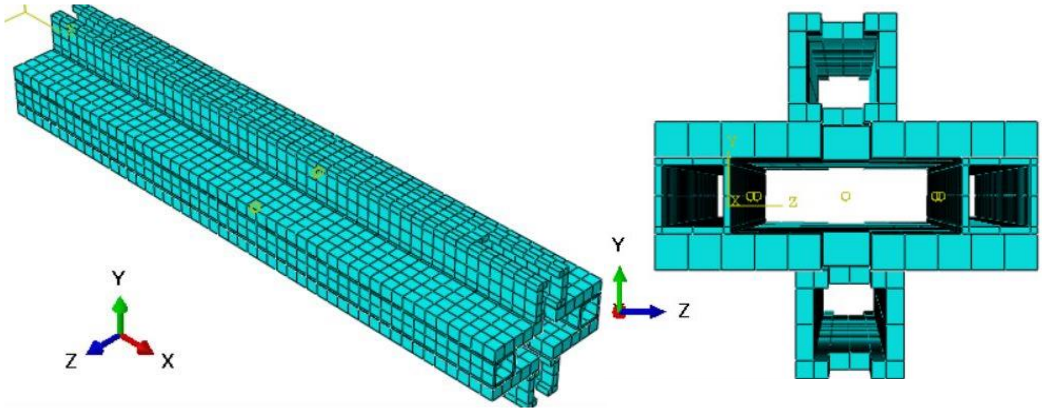


شکل (۳-۲۴) عضو باکس شکل غلاف مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل

کلیه اعضا توسط قید tie به یکدیگر متصل شده اند از جمله اتصال مقطع باکس به مقطع صاف این گونه است.برای مش بندی غلاف از المان های C3D8 استفاده شده است.شکل (۳-۲۵) و (۳-۲۶) جزئیات غلاف را نشان می دهد.

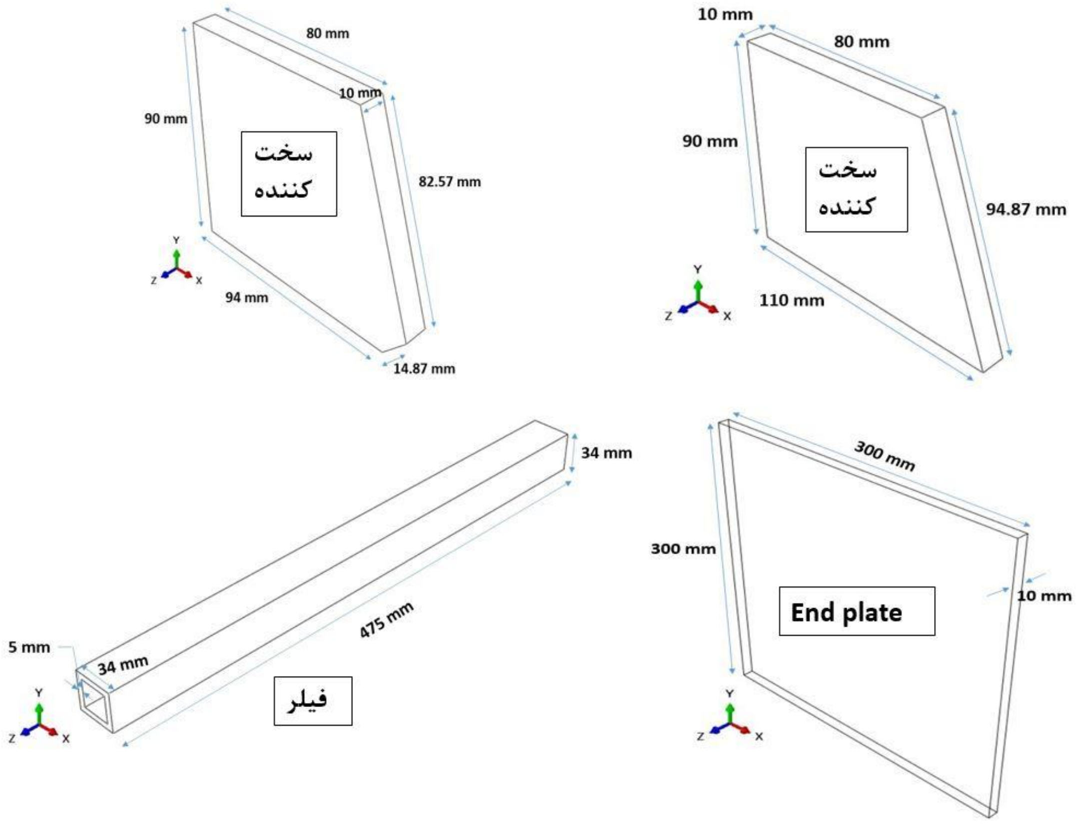


شکل (۳-۲۵) غلاف مهاربندطول کوتاه با هسته S شکل



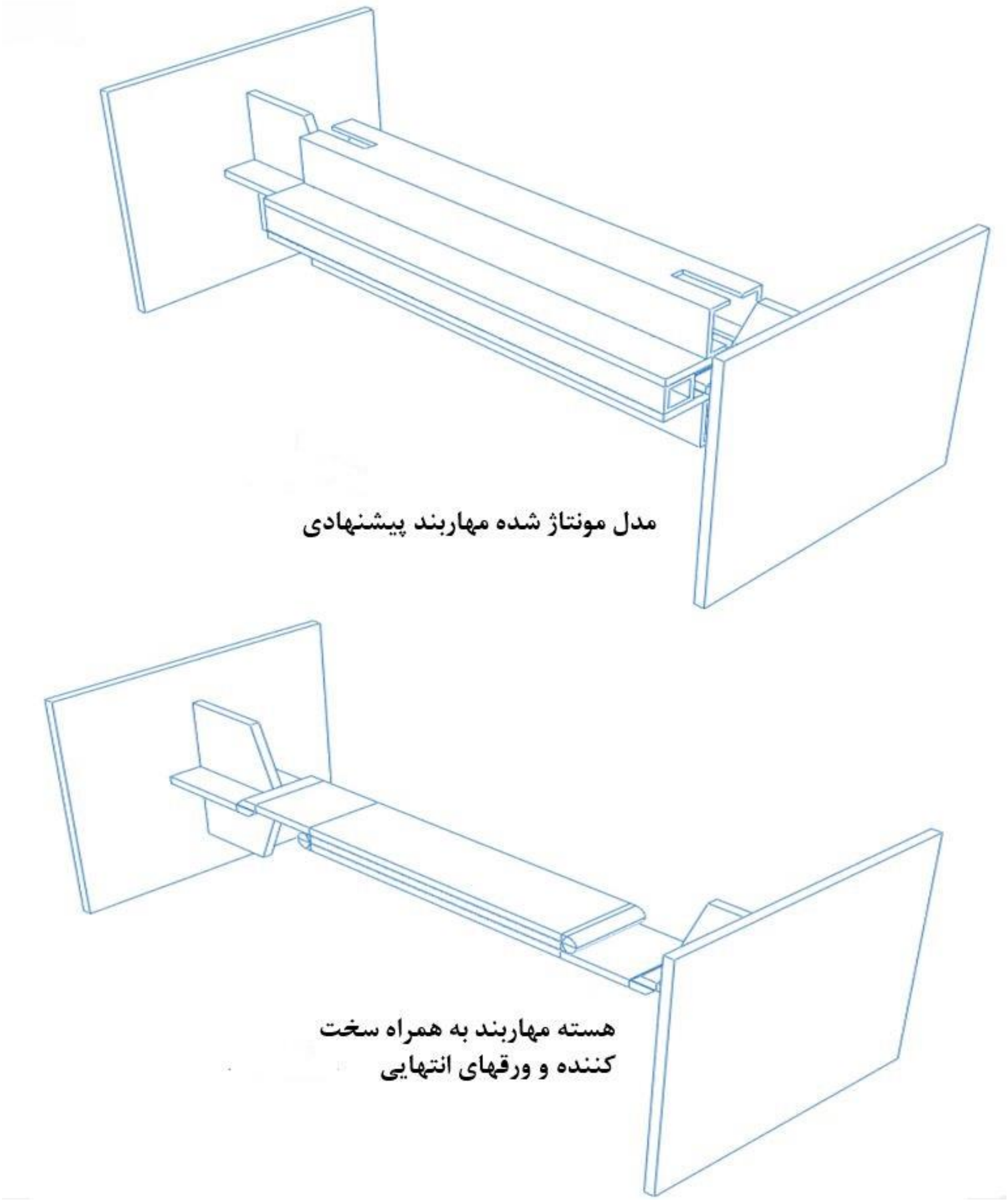
شکل (۳-۲۶) نحوه مش بندی مهاربندطول کوتاه با هسته S شکل

جهت اتصال دو غلاف به یکدیگر از دوفیلر باکس شکل به ابعاد۳۴* ۳۴میلی متر مربع و ضخامت ۵ میلی متر با طولی برابر ۴۷۵ میلی متر استفاده شده است. همچنین به منظورافزایش سختی هسته در بخش های انتهایی آن از سخت کننده هایی از جنس همان مصالح هسته استفاده شده است که جزئیات آنها در شکل (۳-۲۷) نشان داده شده است. بایستی توجه نمود که خصوصیات تماسی هسته با سایر بخش ها به صورت نرمال بدون هرگونه نفوذمصالح در یکدیگر می باشد.



شکل (۳-۲۷) جزئیات ابعادی المان های سخت کننده، فیلر و End plate مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل

از هردو رفتار پلاستیک، سخت شدگی ایزوتروپیک و کینماتیک برای بخش هسته استفاده شده در حالیکه برای سایر بخش ها فقط از رفتار سخت شدگی ایزوتروپیک استفاده شده است. همچنین اثر باوشینگر(Bauschinger Effect) نیز در بخش معرفی مصالح هسته لحاظ شده است.در فصل آینده در رابطه با اثر باوشینگرتوضیحات تکمیلی ارائه خواهد شد. به منظور درک بهتر از مهاربند پیشنهادی نمایی از مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل در شکل (۳-۲۸) نشان داده شده است.



شکل (۳–۲۸) نمایی از مهاربندطول کوتاه با هسته S شکل

- پروتکل بارگذاری

پروتکل بارگذاری براساس استاندارد ASCE 341-10 است.بارها می بایست به منظور ایجاد تغییر شکل های زیر به سازه اعمال گردند.که در آن تغییر شکل مذکور در آزمایش نمونه محوری به عنوان تغییر شکل محوری هسته فولادی می باشد.

دو چرخه ی بارگذاری در تغییر شکل مربوط به $\Delta_b = \Delta_{by}$

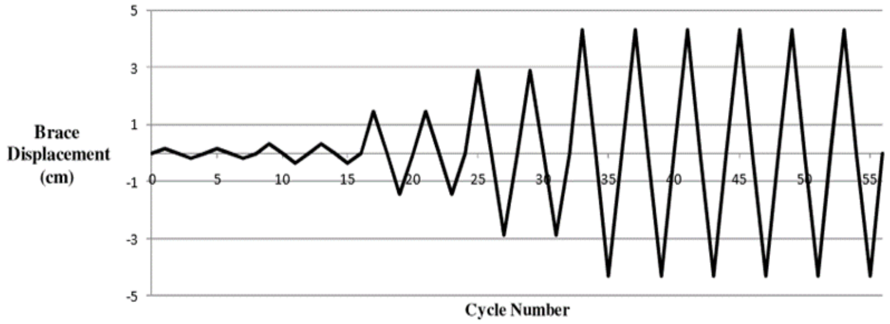
دو چرخه ی بارگذاری در تغییر شکل مربوط به $\Delta_b = 0.5\Delta_{bm}$

دو چرخه ی بارگذاری در تغییر شکل مربوط به $\Delta_b = \Delta_{bm}$

دو چرخه ی بارگذاری در تغییر شکل مربوط به $\Delta_b = 1.5\Delta_{bm}$

دو چرخه ی بارگذاری در تغییر شکل مربوط به $\Delta_b = 2\Delta_{bm}$

چرخه های اضافی بارگذاری در تغییر شکل های متناظربا $\Delta_b = 1.5\Delta_{bm}$ تا رسیدن به تغییر شکل محوری غیر الاستیک تجمعی حداقل ۲۰۰ برابر تغییر شکل تسلیم. که در آن Δ_b تغییر شکل مورد استفاده به منظور بارگذاری نمونه ی مورد آزمایش است. $2\Delta_{bm}$ نیز مقدار و متناظر با دریفت طرح در طبقه می باشد. همچنین Δ_{by} مقدار Δ_b در حد تسلیم نمونه است. آیین نامه الزام می دارد که جابجایی نسبی طبقه در طراحی نباید کمتر از ۱٪ برابر ارتفاع طبقه به منظور محاسبه ی در نظر گرفته شود.در شکل (۳-۲۳) پروتکل بارگذاری ارائه شده است.



شکل (۳-۲۹) پروتکل بارگذاری مهاربندطول کوتاه با هسته S شکل

در این مطالعه از آنالیز استاتیکی غیرخطی برای تحلیل نتایج، استفاده و اثرات تغییرشکل‌های بزرگ و نیز اثرات غیرخطی مصالح و غیرخطی هندسی نیز در مدل‌سازی لحاظ شده و همان‌طور که در بخش معرفی مشخصات مصالح ذکر شد، حالت پلاستیک (غیرخطی) مصالح در نرم‌افزار در نظر گرفته‌شده است و از طرفی ازآنجاکه تغییرشکل‌های بزرگ در طول تحلیل اتفاق می‌افتد و این قابلیت با فعال کردن گزینه‌ی NIgoem در نرم‌افزار فراهم‌شده است.

فصل ۴:

بررسی رفتار مدل و نتایج

۴-۱- مقدمه

با توجه به مطالب گفته‌شده در فصول گذشته، در این فصل به ارزیابی و مقایسه رفتار مهاربند کمانش تاب طول کوتاه با هسته S شکل بر اساس پارامترهای ذکرشده خواهیم پرداخت.

به‌منظور ارزیابی رفتار لرزه‌ای مهاربند موردنظر و دستیابی به پارامترهای مورد نیاز جهت بررسی میزان کیفیت این نوع سیستم‌ها در پاسخ به بارگذاری یکنواخت اعمال شده، چهار عامل اساسی به‌عنوان معیارهای اصلی جهت قضاوت در مورد کیفیت لرزه‌ای در نظر گرفته‌شده که عبارت‌اند از:

- توانایی در اتلاف انرژی‌های بارهای وارده (به شکل مساحت کل زیر منحنی‌های بارتغییرمکان).
علت انتخاب این معیار به دلیل اهمیت میزان اتلاف انرژی و استهلاک نیروهای زلزله در سازه در اثر اعمال بارهای وارده است (جهت مقایسه کمی مناسب می‌باشد).
- سختی اولیه بیشتر در نمودار بار-تغییرمکان حاصل‌شده از تحلیل نمونه.
با توجه به لزوم کنترل تغییر مکان جانبی در ساختمان‌ها، سختی سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی از اهمیت خاصی برخوردار است. طبیعتاً سیستم‌هایی که دارای سختی بیشتری می‌باشند، تغییر مکان جانبی آن‌ها در برابر بارهای جانبی کمتر است.
- شکل‌پذیری (نسبت تغییر مکان جانبی حداکثر به تغییر مکان جانبی نقطه تسلیم).
- مقاومت نهایی (بیشترین نیروی تحمل شده در منحنی بار- تغییر مکان).

در این فصل ابتدا به دلیل اهمیت پدیده خستگی کم سیکلی در مهاربندهای کمانش‌تاب توضیحات تکمیلی در این زمینه بیان خواهد شد. در ادامه مطالبی درباره سختی مهاربندها و همچنین رفتار آنها تحت بارهای چرخه ای ذکر می‌شود. در انتها نیزنتایج حاصل از مدل‌سازی مهاربند کمانش‌تاب با هسته S شکل در نرم افزار Abaqus ارائه خواهد شد.

۴-۲- بررسی خستگی کم سیکلی(LCF)

یکی از مهمترین پدیده هایی که در بارگذاری های چرخه ای بسیار مورد توجه قرار می گیرد، بررسی و کنترل اثر خرابی خستگی کم سیکلی بویژه در سازه های فولادی است. ازهمین رو لازم است تا دراین بخش توضیحات تکمیلی در این زمینه موردبحث قرار گیرد.

در بسیاری موارد تنش اعمالی به قطعه یک تنش استاتیکی با مقدار معین و ثابت نیست بلکه مقدار و جهت تنش با زمان تغییر می کند. در چنین مواردی شکست قطعه در تنشی کمتر از تنش شکست استاتیکی اتفاق می افتد. چنین پدیده ای را پدیده خستگی Fatigue و شکست در اثر آن را شکست خستگی Fatigue Failure و طراحی قطعات برای مقابله با پدیده خستگی را طراحی خستگی Fatigue Design گویند. استحکام قطعات در مقابل شکستگی خستگی را استحکام خستگی Fatigue Strength گفته و با Sf نشان می دهند.

- انواع تنش های متغیر با زمان (تنش های دینامیکی)

۱) قطعه ثابت، بار متغییر

۲) بار ثابت، قطعه متحرک مانند محور چرخان تحت بار جانبی

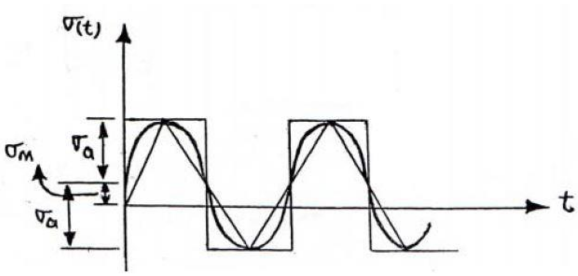
۳) بار متغیر، قطعه متحرک

در حالت کلی نمودار یک تنش دینامیکی را به صورت شکل (۴-۱) می توان در نظر گرفت.

حداکثر مقدار تنش اعمال شده به قطعه: σmax حداقل مقدار تنش اعمال شده به قطعه: σmin

تنش متوسط Mean stress $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$

تنش دامنه Stress Amplitude $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$ (۱)



شکل (۴-۱) حالت کلی یک بارگذاری دینامیکی[۲۶]

۴-۲-۲- روش های طراحی و تعیین عمر خستگی

به طور کلی دو روش کلاسیک متعارف برای طراحی خستگی وجود دارد:

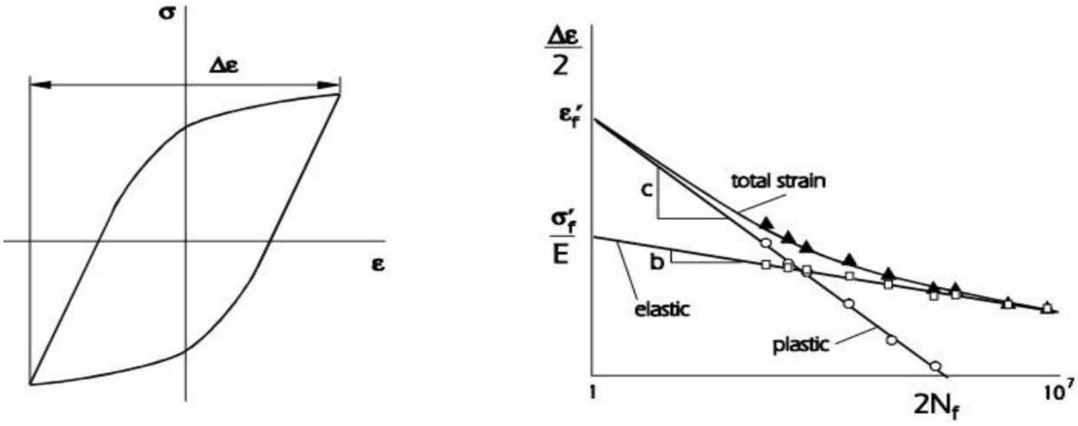
الف - روش تنش مبناء (stress base approach): در محدوده عمر پرچرخه ظاهرا تنش ها عامل اصلی گسیختگی می باشند. در این حالت روش مناسب استفاده دیاگرام S - N بوده که برای بارهای کم نتایج مناسب نشان داده است.

ب- روش کرنش مبناء (stran base approach): در این روش از دیاگرامS - N استفاده می شود و برای اجسام نرم مناسب تر می باشد، چرا که در اجسام نرم به علت تشکیل مناطق خمیری تنش رها شده (ریلکس شده) و تمرکز کرنش افزایش می یابد و کرنش عامل واماندگی ا ست. ظاهرا این رویکرد برای منطقه LCF روش مناسب تری می باشد.

تعریف سیکل: سیکل در خستگی کم چرخه و پرچرخه متفاوت است. در خستگی پرچرخه به ازای هر بار تغییر دربار یک سیکل محسوب می شود ولی در خستگی کم چرخه به هر جهش در بارگذاری می توان سیکل تلقی کرد. به عنوان مثال هر روشن و خاموش وسیله می تواند یک سیکل کم چرخه باشد.

۴-۲-۳- تحلیل خستگی کم چرخه تک محوری از رابطه کافین منسون[30]

کافین - منسون[۱] برای تخمین عمر قطعه تحت بار خستگی روابط ذیل را ارایه کرده اند که مشهورترین و متعارف ترین روابط تحلیل خستگی کم چرخه نیز می باشند:



شکل (۴-۲) تحلیل خستگی کم چرخه با استفاده از رابطه کافین- منسون[۲۶]

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \sigma_f{}'(2N_f)^b + \varepsilon_f{}'(2N_f)^c \qquad (۲)$$

$\Delta\varepsilon$	دامنه کرنشی
$2N_f$	تعداد چرخه ها تا خرابی خستگی
b	مولفه مقاومت خستگی
c	مولفه شکل پذیری خستگی
$\sigma_f{}'$	ضریب مقاومت خستگی
$\varepsilon_f{}'$	ضریب شکل پذیری خستگی

[۱] Coffin-Monson

❖ توصیه های کاربردی در مورد روابط خستگی کم چرخه

در عمل و حین محاسبه عمر خستگی در بسیاری از مواقع ضرائب σ_f' ، ε_f'، b و c مربوط به خواص خستگی ماده به طور مستقیم در دسترس نیست. در این مواقع با داشتن ضرائب مربوط به خواص استاتیکی می توان به محاسبهٔ عمر خستگی پرداخت. البته نتایج حاصله بسیار تقریبی بوده و تنها یک محدوده ای ارائه می دهد.

$$\sigma_f' = S_u + 345 \quad Mpa \qquad S_u : Ultimate\ Strength$$

$$\varepsilon_f' = Ln(\frac{1}{1-RA}) \qquad RA = Area\ reduction\ Percentage$$

$$b = -0.05 \sim -0.12 \ \ (-0.08\ is\ recommended)$$

$$c = -0.7 \sim -0.5 \ \ (-0.6\ is\ recommended)$$

خستگی در اثر اعمال تنش های متغیر با زمان (تنش های دینامیکی) بوجود می آید. دارا بودن حداقل طول لازم برای BRBs که نقش فیوز سازه ای دارند بسیار اساسی است. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که با کاهش بیش از حد طول هسته مهاربند کرنش های پلاستیک افزایش یافته (طبق رابطه (۳)) که این امر به خودی خود احتمال خرابی مهاربند در اثر پدیده خستگی کم سیکلی (LCF) را افزایش خواهد.

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta_{max}}{\alpha L} \times \cos\theta \qquad (۳)$$

که درآن εc تقاضای کرنشی هسته ، Δmax ماکزیمم دریفت طبقه، α نسبت طول تسلیم شونده هسته به طول کل مهاربند،L طول کل BRB، زاویه انحراف مهاربند نسبت به افق

مطالعات بروی اثر خستگی کم سیکلی BRBs نشان می‌دهد که ظرفیت خستگی به عواملی همچون : شکل هسته، سختی مکانیزم مقاوم خمشی، نسبت عرض به ضخامت اعضای محوری و اصطکاک بین هسته و غلاف وابسته است[31-33]. همچنین تحقیقات صورت گرفته برروی عمر خستگی BRBs نشان می دهد که هرگونه ناپیوستگی، تغییرات در هندسه ، جوش و اتصالات در ناحیه هسته که به

عنوان ناحیه محافظت شده در استاندارد AISC 341-10 از آن یاد شده به شدت عمر خستگی را کاهش می دهد[34-37].

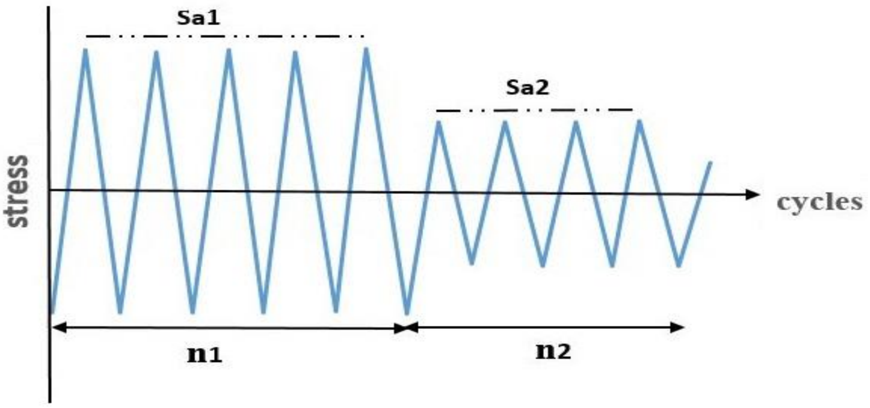
براساس مطالعاتی که توسط رضوی و همکاران [17]صورت گرفته است رابطه ناکامورا و همکارانش [38] (رابطه (۴))،دربین روابط موجود به منظور محاسبه خستگی BRBs برای کرنش های زیر ۷٪ بسیار محافظه کارانه است.

$$\Delta\varepsilon = 0.2048 N_f^{-0.490} \qquad (۴)$$

باید توجه نمود به علت متغیر بودن دامنه کرنشی اعمالی به BRBs بایستی شاخص خرابی خستگی تجمعی (FDI) را که براساس رابطه ماینر ارزیابی می گردد معرفی نمود،رابطه (۵).

$$FDI = \sum \frac{n_i}{N_{fi}} \qquad (۵)$$

خرابی زمانی رخ می دهد که FDI=1 شود، بر این اساس طول هسته به طریقی تقریب زده می شود که FDI کمتر از یک باشد. برای درک بهتر رابطه (۵) شکل (۴-۳) ارائه گردیده است.



شکل (۴-۳) مجموعه تنش ها با دامنه ثابت

به منظور بررسی اثر خستگی کم سیکلی روابط ماینر و ناکامورا را مورد بررسی قرار دادیم تا در ضمن بررسی وقوع یا عدم وقوع گسیختگی در مهاربند طول بهینه آن نیز حاصل شود. نتایج حاصل مربوط به رابطه ناکامورا تعداد چرخه های لازم تا خرابی خستگی کم سیکلی را ارائه می دهد جدول (۴-۱).

جدول (۴-۱) تعداد چرخه ها و شاخص خرابی برای مهاربندطول کوتاه با هسته S شکل

دامنه های کرنشی	$\Delta\varepsilon$	N_f (تعداد چرخه ها تا خرابی)	FDI (شاخص خرابی)
Δby	۰.۰۰۴۶۴	۲۲۷۴	۰.۹۳۸<۱
0.5Δbm	۰.۰۳۸	۳۱	
Δbm	۰.۰۷۵۵	۷	
1.5Δbm	۰.۱۱۳	۳.۵	
2Δbm	۰.۱۵۱	۲	

همانطور که ملاحظه می شود شاخص خرابی خستگی تجمعی زیر ۱ است و این موضوع بیانگر عدم گسیختگی مهاربند تا دامنه کرنشی ۱,۵Δbm است با شروع دامنه کرنشی ۲Δbm بعد از گذراندن ۲ سیکل اولیه پیشنهادی استاندارد AISC 341-10 مهاربند در آستانه گسیختگی قرار خواهد گرفت.

۴-۳- کنترل رابطه واتانایب برای غلاف

یکی از ضوابط مهم در طراحی مکانیزم مقاوم در برابر کمانش (غلاف)، بررسی وکنترل رابطه واتانایب است تا مهاربند دچار کمانش نشود و همچنین در غلاف نیز نیروی محوری قابل توجهی بوجود نیاید. بدین منظور واتانایب وهمکاران پیشنهاد نمودند که غلاف باید برای تحمل سختی خمشی معادل رابطه زیر طراحی گردد:

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1 \qquad (۶)$$

که Py مقاومت تسلیم عضو مقید تسلیم شونده و Pe مقاومت کمانش الاستیک فولادی است.

$$P_e = \frac{\pi^2 E I_{sc}}{L_{sc}} \quad (۷)$$

که در آن E مدول الاستیسیته، Isc ممان اینرسی غلاف فلزی وLsc طول آن است.

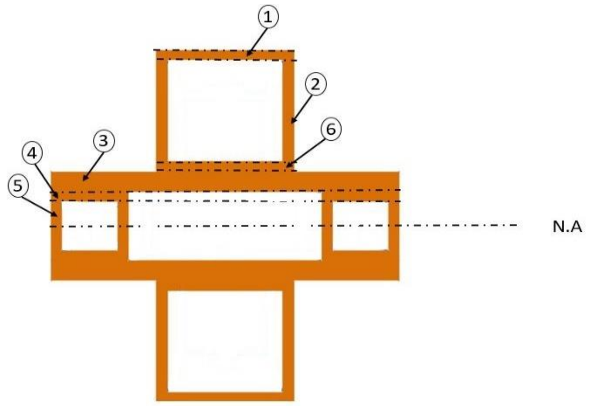
اثر سخت شوندگی کرنش چرخه ای در رابطه مذکوراعمال نشده است. با فرض اینکه سخت شوندگی کرنش چرخه ای باعث افزایش ۳۰٪ مقاومت فشاری مهاربند شود و یک ضریب Φبرابر ۰,۸۵در صورت کسر اضافه شود آنگاه رابطه به صورت زیر اصلاح می گردد:

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1.53 \quad (۸)$$

مقطع غلاف مورد استفاده برای مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل در شکل (۴-۴) نشان داده شده است و نتایج به صورت جدول(۴-۲) ارائه می شود.

جدول (۴-۲) کنترل رابطه واتانایب برای غلاف مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل

Pe /Py	ممان اینرسی کل	Pe (KN)	Py (KN)
299494.9495	14279235.32	59300000	198



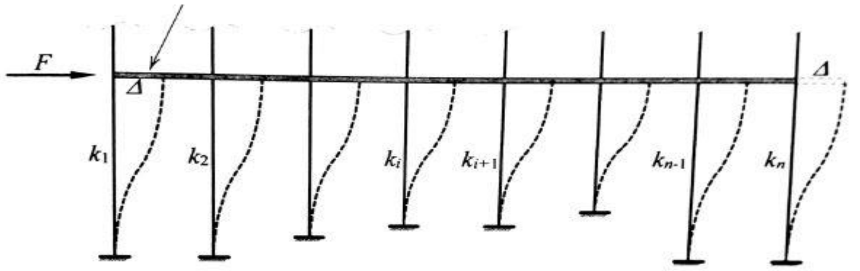
شکل (۴-۴) مقطع غلاف مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل و ناحیه بندی آن به منظور محاسبه ممان اینرسی آن

۴-۴- مقایسه میزان سختی مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل با مهاربند طول کوتاه رضوی

۴-۴-۱- سختی های سری و موازی

نحوه قرار گرفتن اعضای مقاوم در برابر زلزله و نیز نوع تبادل نیرو در آنها و در نتیجه رابطه ی نیرو-تغییر شکل در این اعضا معرف و بیانگر آرایش سختی های به صورت موازی و سری است.

شکل (۴-۵) به خوبی وضعیت اعضا با آرایش سختیهای موازی را نشان میدهد.



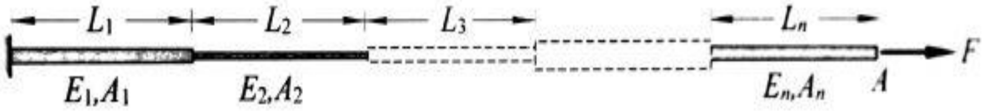
شکل (۴-۵) کف صلب همراه با عناصر مقاوم قائم با آرایش سختی های موازی[۱]

در آرایش سختیهای موازی (شکل ۴-۵) تغییر مکان تمام اعضا یکسان و برابر Δ میباشد. در نتیجه می توان نوشت:

$$\Delta = \frac{F}{K_{eq}}$$
$$K_{eq} = \sum_{i=1}^{n} k_i \qquad (۹)$$

دررابطه فوق سختی معادل نامیده می شود و برابر مجموع سختی های اعضا می باشد. نیرو در آرایش سختیهای موازی به نسبت سختی اعضا توزیع می شود.

اکنون حالت دیگری از نحوه ی آرایش سختیها مطابق شکل (۴-۶) را در نظر بگیرید که نیروی F توسط عناصر مقاوم ۱ تا n تحمل می شود.



شکل (۴-۶) آرایش سختی های سری[۱]

در شکل (۴-۶) نیرو در کلیه ی اعضا برابر است. به بیانی دیگر آرایش به گونه ای است که مقدارکل نیرو از طریق کلیه اعضای سری عبور کرده و به تکیه گاه منتقل شده و بین آنان توزیع نمی گردد.Δ تغییر مکان کل نقطه A برابر مجموع تغییر شکل های اعضای ۱ تا n می باشد. در این صورت می توان نوشت:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + ... + \Delta_n \quad (۱۰)$$

با جایگزینی $\Delta_i = \frac{FL_i}{A_i E_i}$ رابطه ی (۱۰) چنین خواهد شد.

$$\Delta = F\sum_{i=1}^{n} \frac{Li}{AiEi} \quad (۱۱)$$

چنانچه نسبت F/Δ را سختی معادل سیستم K_{eq} معرفی کنیم و سختی هر عضو را $\frac{A_i}{E_i L_i}$ در نظر بگیریم، آنگاه رابطه(۱۱) به صورت زیر نوشته خواهد شد:

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + ... + \frac{1}{k_n} \quad (۱۲)$$

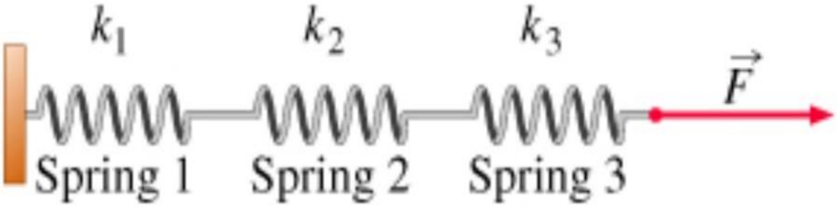
چنانچه نسبت $\frac{1}{K_i}$ را با fi (ضریب نرمی یا انعطاف پذیری) جایگزین کنیم آنگاه در این نوع آرایش سری، نرمی معادل feq برابر مجموع نرمی های اعضا می باشد.

از روابط (۱۰) و (۱۲) می توان نتیجه گرفت در حالتی که اعضای مقاوم با آرایش سختی سری (شکل ۴-۶) نیرو تحمل نمایند تغییر شکل هر یک از اعضا می تواند نقش عمده ای در تغییر شکل کل سازه ایفا کند. به عبارت دیگر نرمی بیش از حد هر عضـــو می تواند بر تغییر شـــکل کل ســـازه تأثیر زیادی داشته باشد. در حالت آرایش سختیها به صورت موازی (شکل۴-۵) وضعیت به گونه ای دیگر است. در این و ضعیت حذف یکی از سختیها، تنها آن ع ضو را از گردونه خارج کرده و سختی سازه را به اندازه سختی همان عضو کاهش میدهد.

اع ضای قابهای خم شی و قاب های مهاربندی شده با هر دو آرایش سختیهای موازی و سری در برابر نیروهای زلزله مقاومت می کنند

۴-۴-۲- خصوصیات فنرهای سری

با در نظر گرفتن شــکل (۴-۷) ویژگی فنرهای ســری به صــورت جدول (۴-۳) می باشــد. در مهاربند پیشنهادی سه ردیف ورقه فولادی را می توان با سه فنر سری معادل نمود همانطور که در شکل (۴-۷) نشان داده شده است.



شکل (۴-۷) نمایش قرارگیری فنرها به صورت سری

جدول (۴-۳) خصوصیات فنرهای سری

	فنرهای سری
نیرو	$F_t=f_۱=f_۲=....=f_n$
تغییر شکل	$X_t=x_۱+x_۲+...+x_n$
ثابت فنر	$K_t=۱/(۱/k_۱+۱/k_۲+....+۱/k_n)$

مهاربند مورد مطالعه رضـوی به صـورت یک ورق صـاف اسـت که سـختی آن از رابطه (K= EA/L) حاصل می شود حال با در نظر گرفتن شرایط مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل($L' = \frac{L}{3}$) میزان سختی آن برابراست با:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \sum \frac{1}{k_i} \Rightarrow \frac{1}{K_{eq}} = \frac{3*\frac{L}{3}}{EA} \Rightarrow K_{eq} = \frac{EA}{L} \qquad (۱۳)$$

در نتیجه همانطور که ملاحظه می شود مقدار سختی مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل با مهاربند طول کوتاه رضوی برابر است.

۴-۵- مقایسه میزان کرنش پلاستیک مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل با مهاربند طول کوتاه رضوی

میزان کرنش پلاستیک در مهاربند رضوی براساس رابطه($\varepsilon_p = \frac{\Delta L}{L}$) حاصل می شود. لذا در ادامه مقدار کرنش پلاستیک در مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل را محاسبه می نماییم.

$$\varepsilon_P{}' = \frac{\Delta L'}{L'} = \frac{\frac{\Delta L}{3}}{\frac{L}{3}} = \frac{\Delta L}{L}$$

در فنرهای سری برای مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل مقادیر تغییر شکل ها برابر است با :

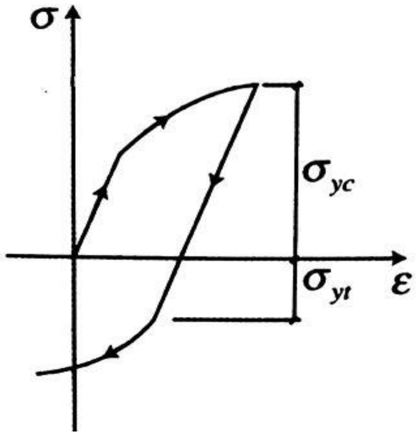
$$\Delta_1 = \frac{F}{K_1}, \Delta_2 = \frac{F}{K_2}, \Delta_3 = \frac{F}{K_3}$$

با توجه به اینکه میزان تغییر شکل در هر ورق مهاربند S شکل با هم برابرند در نتیجه میزان سختی در هر یک از آنها نیز با هم برابر است ($K_1 = K_2 = K_3$).

درنتیجه ملاحظه می شود که مقدار کرنش پلاستیک در مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل با مقدار متناظر آن درمهاربند پیشنهادی رضوی برابر است($\varepsilon_P = \varepsilon_P{}'$) .

۴-۶- اثرباوشینگر (Bauschinger effect):

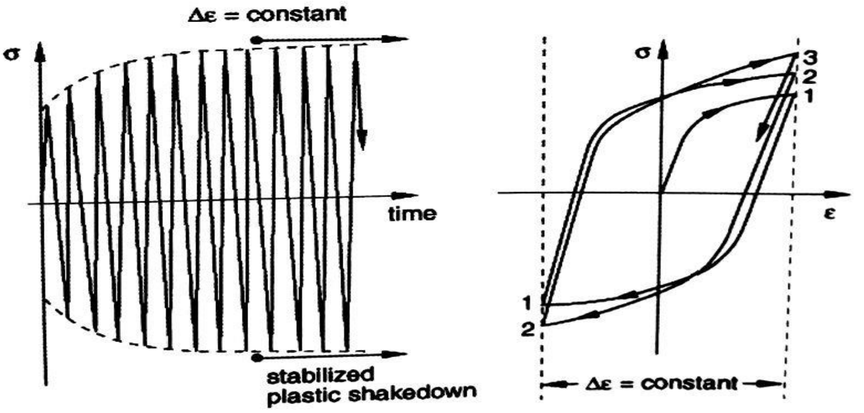
این مشخصه در حقیقت تأثیر کاهش یافتن تنش جاری شدن بعد از تغییرشکل پلاستیک در اثر بارگذاری اولیه ا ست. این پدیده بعد از ادامه چرخه ها کاهش می یابد. می توان این پدیده را با در نظر گرفتن backstressهای زیاد مدل کرد. برای تفهیم بهتر مطلب، شکل (۴-۸) را مشاهده کنید.



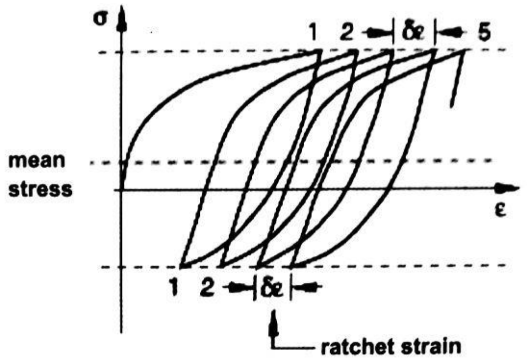
شکل (۴-۸) اثر باوشینگر[۲۵]

۴-۶-۱- سخت شدگی چرخه ای با کاهش پلاستیک (Cyclic hardening with plastic shakedown):

این پدیده در آزمایش های کنترل شده تنش - کرنش متقارن رخ می دهد. همان طور که در شکل(۴-۹) مشاهده می شود، رفتار فلزات را در اثر چرخه های بارگذاری قابل پیش بینی می توان دید.



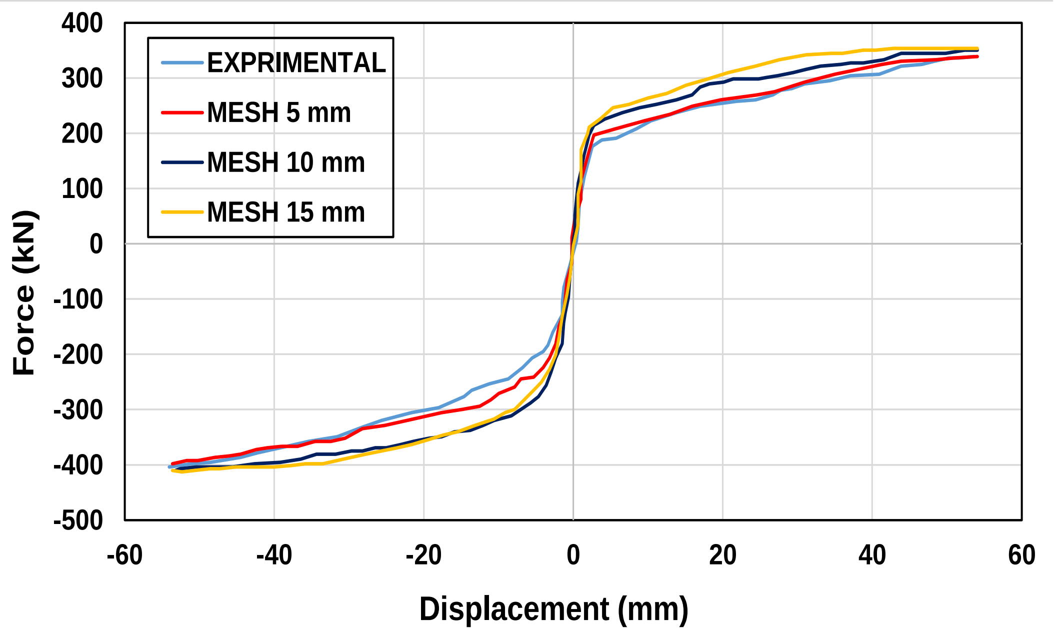
شکل (۴-۹) کاهش پلاستیک[۲۵]



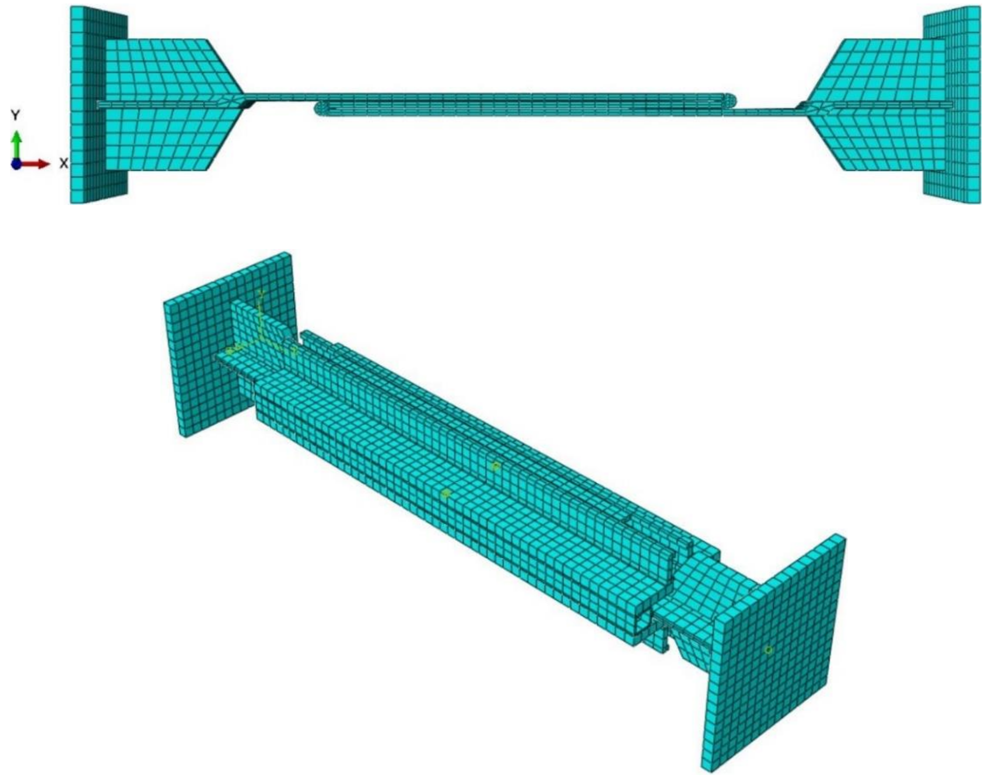
شکل (۴-۱۰) خزش سیکلی[۲۵]

۴-۷- آنالیز حساسیت مهاربندکمانش تاب پیشنهادی

در مش بندی مدل وجود گره‌های مشترک در المان‌های مجاور، سازگاری تغییر شکل‌ها را بین اجزای مختلف فراهم می‌کند. اجزای مختلف مدل ایجادشـــده با اســـتفاده از روش Structured شـــبکه‌بندی شده‌اند. این روش مناسب برای المان‌های منظم با گوشه‌های نسبتاً متعامد است.به علت کمانش‌های متعدد در نواحی مختلف مدل، همگرایی عددی به‌ســختی صــورت می‌گیرد. لذا شــبکه‌بندی درشــت مناسب نیست. شبکه‌بندی ریز هم، زمان تحلیل توسط نرم‌افزار اجزای محدود را افزایش می‌دهد. ابعاد شـــبکه‌بندی برای هر مدل تا جایی کاهش داده‌شـــده اســـت که در نتایج تغییر قابل‌ملاحظه‌ای را ایجاد نکند. ازاین‌رو مدل‌های با ابعاد شبکه‌بندی ۵، ۱۰، ۱۵ میلی‌متر آنالیز حساسیت شده است. شبکه‌بندی ۱۰ میلی‌متر مناسب‌ترین حالت است. نتایج آنالیز حساسیت به شبکه بندی در شکل (۴-۱۱) و شبکه بندی مهاربند پیشنهادی در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۱) آنالیز حساسیت به شبکه بندی



شکل (۴-۱۲) شبکه بندی مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل

۴-۸- نتایج تحلیلی مهاربندکمانش تاب طول کوتاه با هسته S شکل

همانطورکه قبلابیان شد مدل پیشنهادی از جمله نمونه های متفاوتی از مهاربند های کمانش تاب با طول کوتاه است. آرایش متفاوت هسته باعث شده است که نتوان نمونه مشابهی را برای مقایسه نتایج یافت. اما از آنجا که هدف ارائه مدلی بود تا بتواندبرخی مشکلات رایج مهاربندهای کمانش تاب متداول را رفع نماید لذا در بخش صحت سنجی هم همانطورکه ملاحظه شد سه مدل شامل دو مهاربند طول کوتاه و یک مهاربند طول بلند انتخاب شد.در این بخش نتایج تحلیلی مدل پیشنهادی ارائه می گردد در ضمن اینکه نتایج با نتایج حاصل از مدل های صحت سنجی شده نیز مقایسه می شود تا برتری و محدودیت های مدل پیشنهادی آشکارگردد.

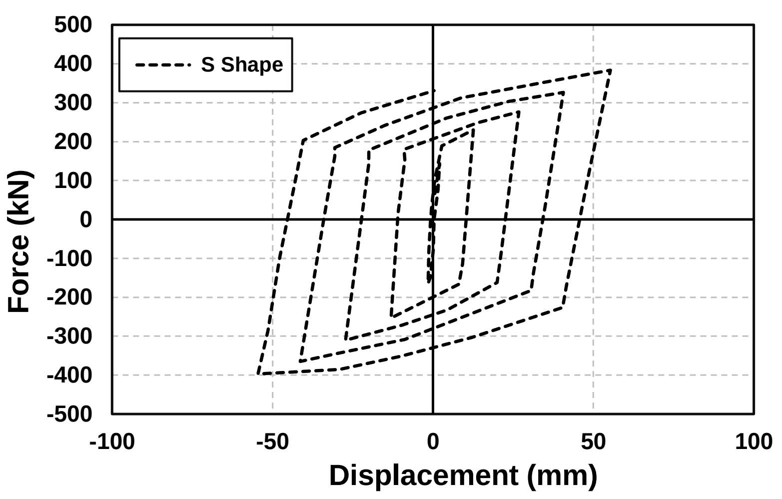
۴-۸-۱- نمودار هیسترزیس مهاربندS شکل و نحوه توزیع تنش

در این بخش نمودارهیسترزیس مهاربند کمانش تاب باهسته S شکل حاصل از نتایج تحلیل آباکوس ارائه می گردد.همانطور که در شکل (۴-۱۳) نیز مشاهده می شود این نمودار دارای چرخه های فشاری و کششی منظمی است که بیانگررفتار مناسب مهاربند می باشد. نتایج حاصل از تحلیل چرخه ای مشخص کرد که مهاربند پیشنهادی تا انتهای تحلیل پاسخ چرخه ای پایداری از خود نشان داده است. پاسخ چرخه ای پایدار و بدون افت بارنشان دهنده عملکرد قابل قبول مهاربند بدون هیچ گونه کمانش یا گسیختگی در هسته می باشد. به منظور بررسی دقیق تر نتایج، ضرایبω و β که به ترتیب ضریب اضافه مقاومت در فشار و ضریب سخت شوندگی کرنشی می باشند به صورت زیر محاسبه می شوند:

(۱۴)
$$\beta = \frac{\beta\omega F_{ysc}A_{sc}}{\omega F_{ysc}A_{sc}} = \frac{P_{max}}{T_{max}}$$

(۱۵)
$$\omega = \frac{\omega F_{ysc}A_{sc}}{F_{ysc}A_{sc}} = \frac{T_{max}}{F_{ysc}A_{sc}}$$

که در این روابط Pmax و Tmax به ترتیب بیشترین نیروی فشاری و کششی مشاهده شده طی آنالیز هستند. همچنین Asc و Fysc به ترتیب سطح مقطع هسته ی تسلیم شونده و تنش تسلیم هسته می باشند. در مطالعه ی حاضر ضرایب ω و β به صورت جدول (۴-۴) ارائه شده است.



شکل (۴-۱۳) نمودار چرخه ای مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل

جدول (۴-۴) مقادیرω و β برای مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل

CYCLE	ω	β	ωβ
0.5Δbm	1.01	1.12	1.1312
0.5Δbm	1.16	1.13	1.3108
Δbm	1.24	1.18	1.4632
Δbm	1.37	1.18	1.6166
1.5Δbm	1.45	1.23	1.7835
1.5Δbm	1.6	1.23	1.968
2Δbm	1.6	1.22	1.952
2Δbm	1.66	1.18	1.9588

ضریب β با افزایش اثر پواسن [۱]در هسته و همچنین افزایش نیروی اصطکاک بین هسته و غلاف، افزایش می یابد. مقدار این ضریب در مطالعه ی حاضر کمتر از مقدار حداکثر مجاز (۱,۳) در آیین نامه ی AISC است. این پدیده نشان میدهد اگر چه ماکزیمم کرنش در هسته نسبتا بالاست و اثر پواسن قابل توجه می باشد، ولی با استفاده از مصالح جداکننده و کاهش نیروی اصطکاک مقدار ضریب β همچنان در محدوده ی مجاز باقی می ماند.

ضریب ω به مشخصات مصالح فولادی، تاریخچه ی بارگذاری و جزئیات BRB بستگی دارد. در این تحقیق به دلیل طول کوتاه قسمت تسلیم شونده، کرنش در آن افزایش می یابد. افزایش کرنش در این قسمت افزایش تنش را نیز به همراه خواهد داشت که نگرانی هایی در خصوص افزایش ω را به همراه دارد. محققین در تحقیقات پیشین مقدار این ضریب را از۱ تا ۱,۶۲ بدست آورده اند [7,27,28].

قابل ذکر است که استاندارد AISC محدودیتی برای این پارامتر در نظر نگرفته است. مقادیرپارامترهای ذکر شده برای مهاربند طول بلند(BRB) و همچنین مهاربند شماره ۱۱ ارياشار به ترتیب در جداول (۴-۵) و (۴-۶) نشان داده شده است.

[۱] Poisson's Effect

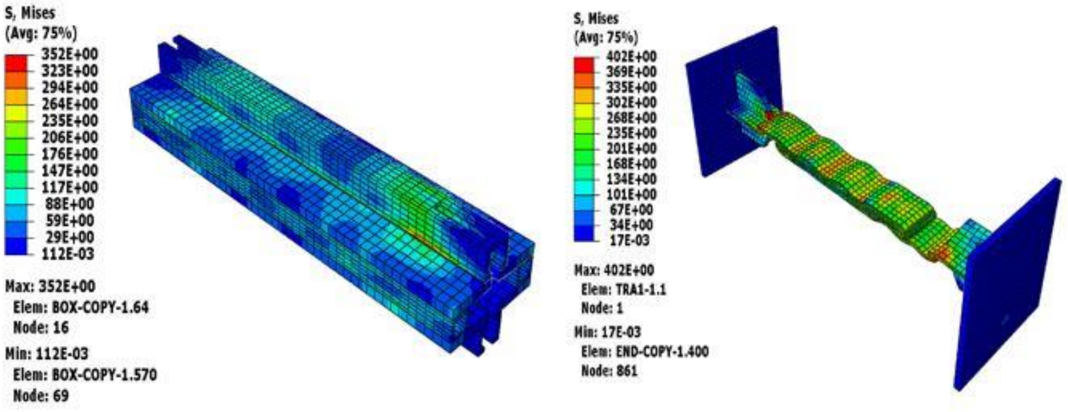
جدول (۴-۵) مقادیر ω و β برای مهاربند RLBRB

CYCLE	ω	β	ωβ
0.5Δbm	1.02	1.15	1.173
0.5Δbm	1.18	1.16	1.3688
Δbm	1.27	1.19	1.5113
Δbm	1.39	1.19	1.6541
1.5Δbm	1.48	1.24	1.8352
1.5Δbm	1.61	1.25	2.0125
2Δbm	1.61	1.25	2.0125
2Δbm	1.68	1.21	2.0328

جدول (۴-۶) مقادیر ω و β برای مهاربند ERYASHAR

CYCLE	ω	β	ωβ
0.5Δbm	0.998	1.02	1.01796
0.5Δbm	0.997	1.02	1.01694
Δbm	1.051	1.047	1.100397
Δbm	1.11	1.06	1.1766
1.5Δbm	1.113	1.068	1.188684
1.5Δbm	1.202	1.078	1.295756
2Δbm	1.207	1.081	1.304767
2Δbm	1.209	1.09	1.31781

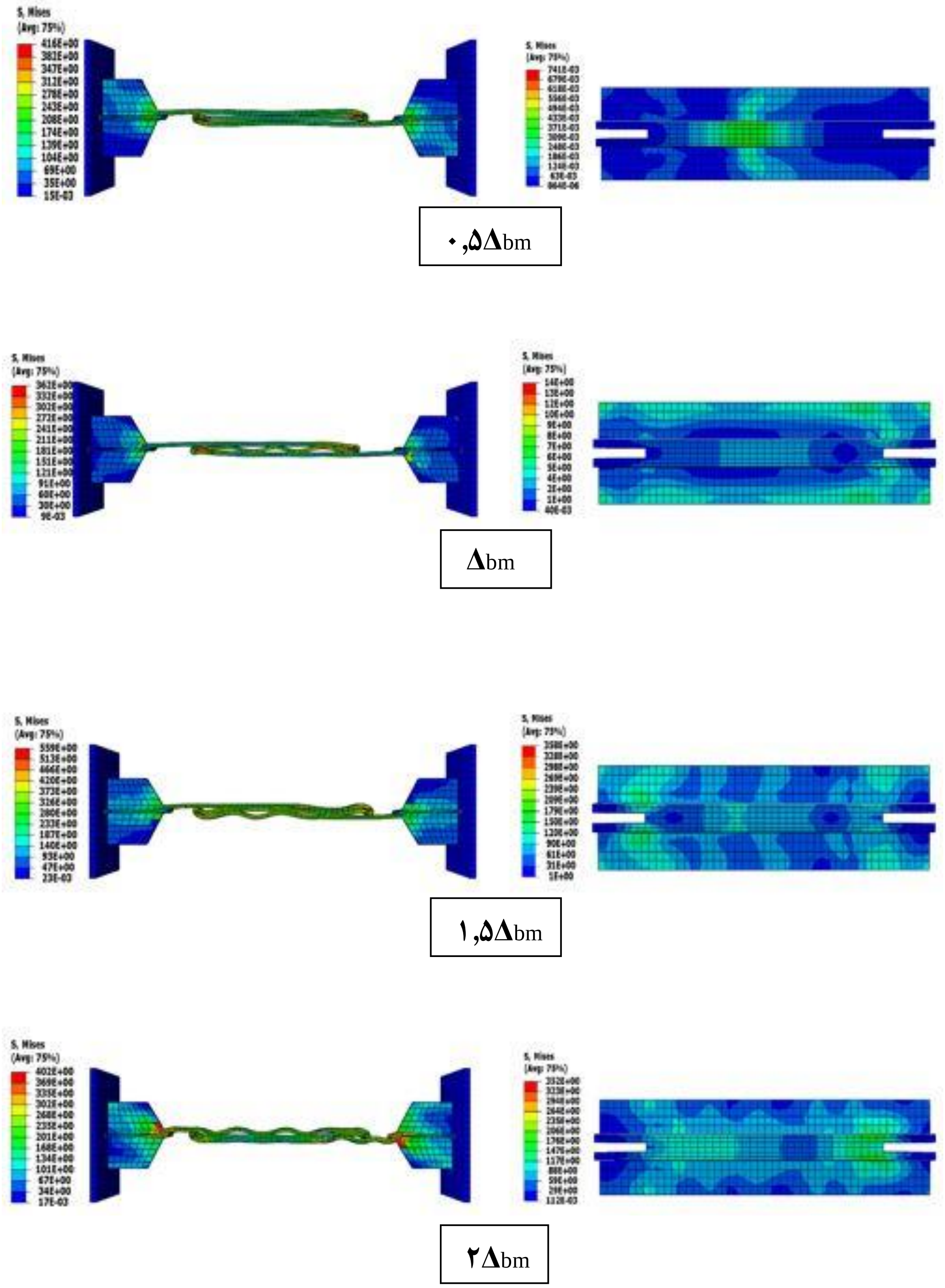
مهاربند پیشنهادی در این مطالعه در واقع یک نوع RLBRB تمام فولادی با قابلیت باز و بسته شدن بود. تلاش شده بود که جزئیات بندی این مهاربند از جزئیات بندی مهاربندهای متداول خیلی دور نباشد. تحلیل المان محدود تحت پروتکل بارگذاری آیین نامه ی AISC seismic provisions2005 رفتار چرخه ای مناسبی را برای این مهاربند نشان داد. در شکل (۴-۱۴) نیز نحوه توزیع تنش فون میزز در هسته مهاربند S شکل و همچنین غلاف به نمایش در آمده است.همانطور که ملاحظه می شود شاهد توزیع تنش یکنواخت در هردو عضو هستیم که این خود بیانگراستهلاک انرژی یکسان توسط تمام المان هامی باشد.



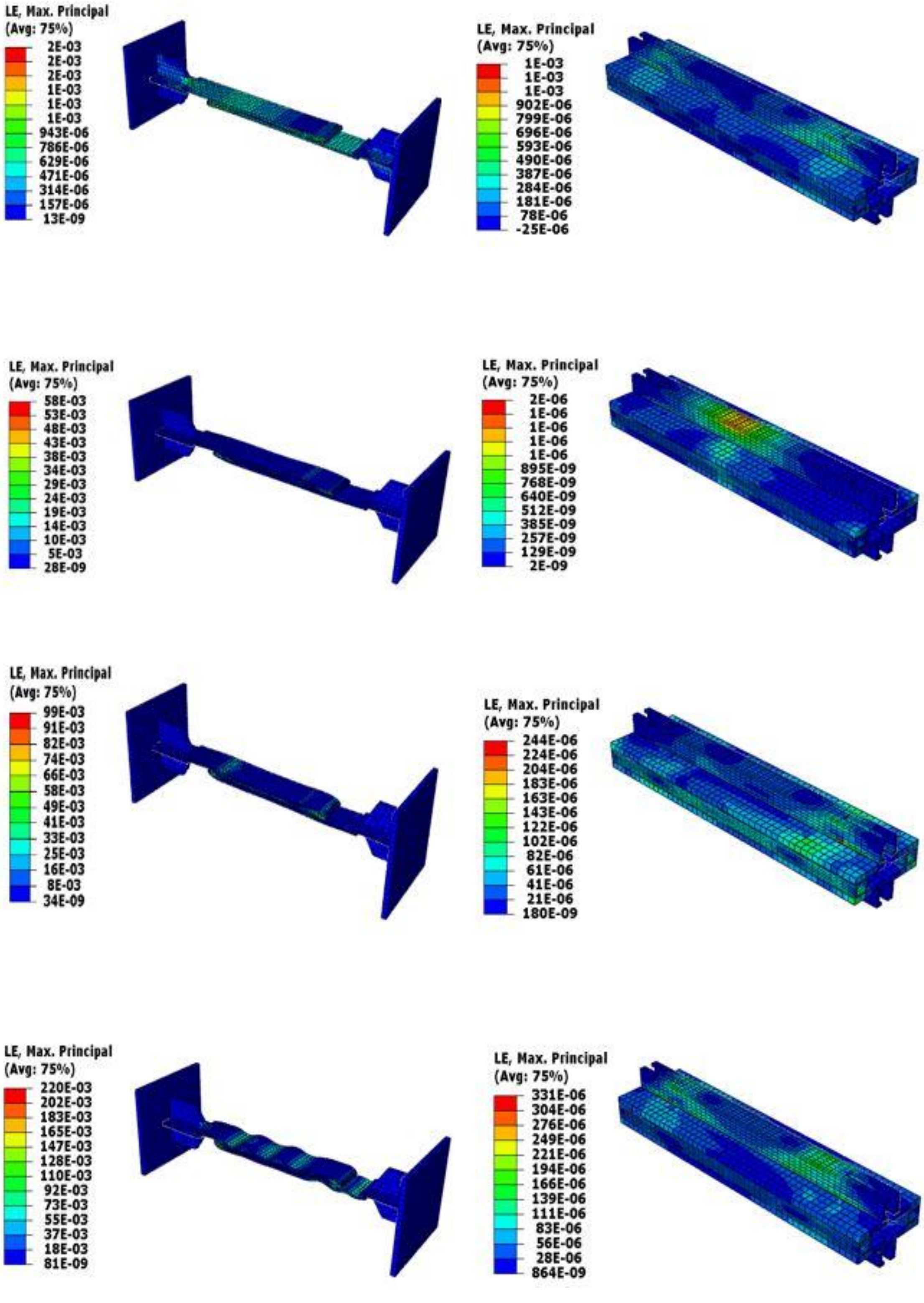
شکل (۴-۱۴) توزیع تنش فون میزز در مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل

در ادامه نحوه توزیع تنش فون میزز در هسته و غلاف برحسب چهار دامنه کرنشی اعمالی در شکل (۴-۱۵) نشان داده شد است.

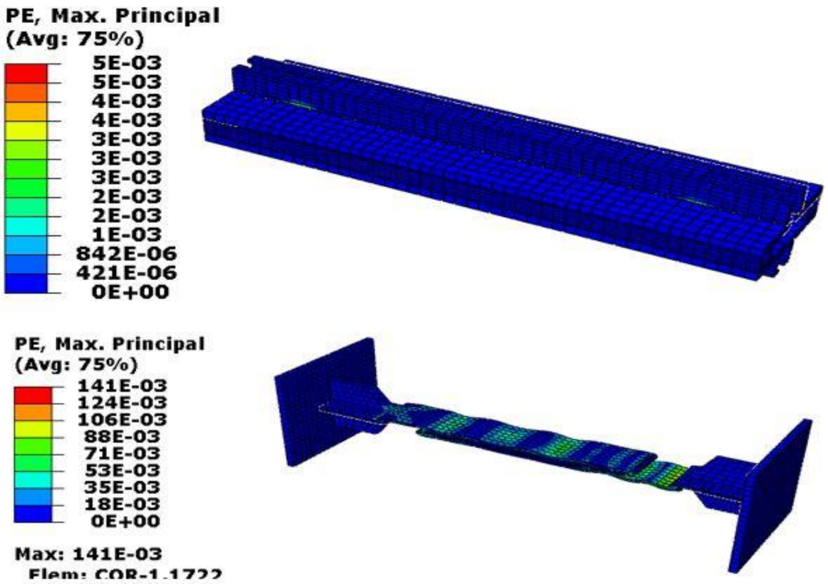
همچنین نحوه توزیع کرنش الاستیک و کرنش پلاستیک به ترتیب در شکل های (۴-۱۶) و (۴-۱۷) ارائه می گردد.از آنجایی که انتظار می رفت هسته تحت کرنش های بالایی قرار گیرد لذا هسته در راستای ضخامت به ۲ بخش و در راستای عرض به ۷ بخش مساوی تقسیم شده است.



شکل (۴-۱۵) توزیع تنش فون میزز در دامنه های کرنشی مختلف برای مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل



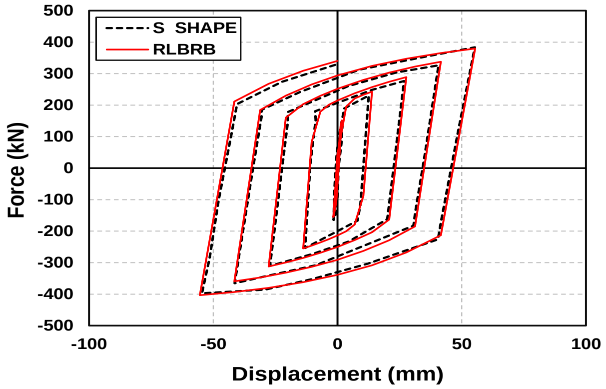
شکل (۴-۱۶) توزیع کرنش الاستیک برای مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل



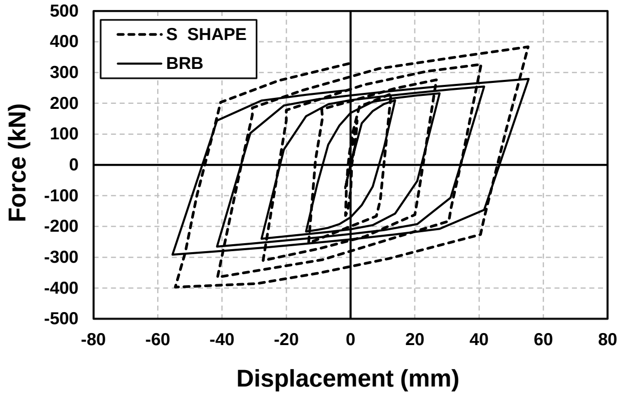
شکل (۴-۱۷) توزیع کرنش پلاستیک برای مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل

۴-۸-۲- محاسبه و مقایسه میزان استهلاک انرژی مهاربند S شکل

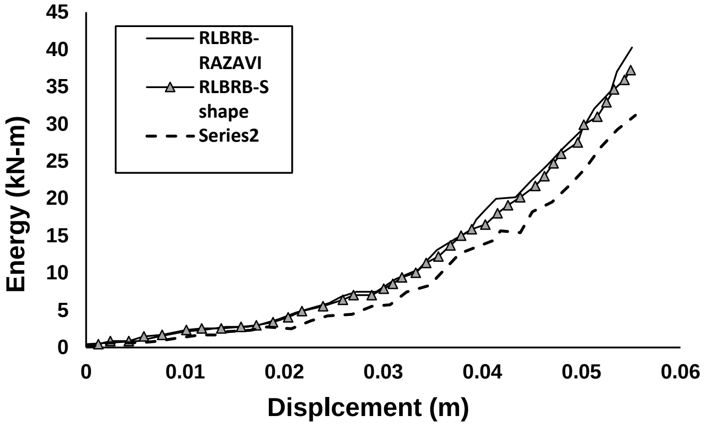
یکی از مهمترین وظایف مهاربندها اتلاف انرژی و جلوگیری از رسیدن این انرژی به عناصر سازه ای می باشد.لذا به دلیل اهمیت موضوع، در این بخش با توجه به نمودار های هیسترزیس حاصل از نتایج تحلیل و همچنین میزان کار خارجی انجام شده توسط مهاربند میزان اتلاف انرژی در مهاربند پیشنهادی محاسبه می گردد. برای این منظور سطح زیر نمودار هیسترزیس که در واقع بیانگر میزان استهلاک انرژی است مورد بررسی قرار میگیرد.در شکل(۴-۱۸) نمودار هیسترزیس مهاربند کمانش تاب با هسته S شکل در مقایسه با نمودار مشابه آن برای مهاربند کمانش تاب با طول کوتاه مورد مطالعه توسط رضوی و همکاران مشاهده می شود. به دلیل مشابهت های متعدد از جمله ابعاد سطح مقطع، پروتکل بارگذاری و نوع مصالح و چیدمان هر دو مهاربند مشاهده می شود که اتلاف انرژی هر دو مهاربند تقریبا یکسان می باشد. اما برعکس همانطور که در شکل (۴-۱۹) نشان داده شده میزان اتلاف انرژی مهاربند S شکل بسیار بیشتر از مهاربندBRB با طول بلند می باشد. در شکل (۴-۲۰) نیز مقدار کار خارجی مهاربند ها باهم مقایسه شده است.



شکل (۴-۱۸) مقایسه اتلاف انرژی برای مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل و RLBRB



شکل (۴-۱۹) مقایسه اتلاف انرژی برای مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل و BRB



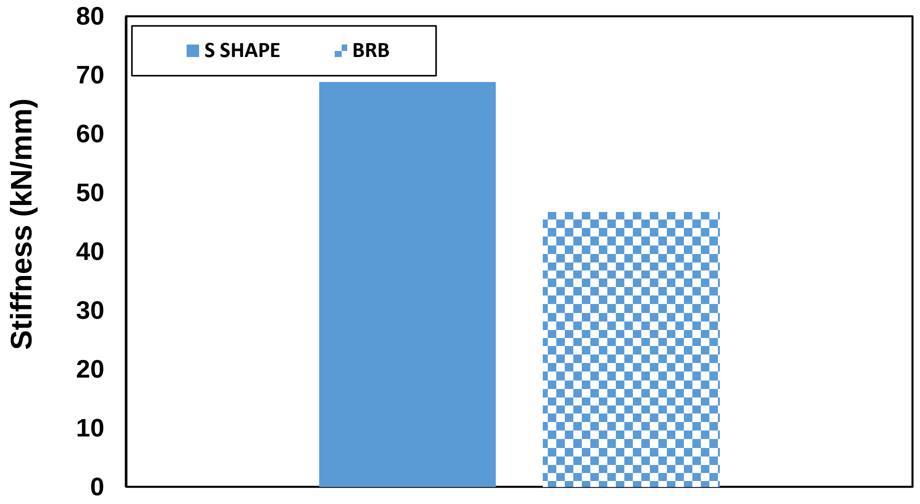
شکل (۴-۲۰) مقایسه کار خارجی انجام شده برای مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل، BRB و RLBRB

۴-۸-۳- مقایسه میزان سختی اولیه مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل

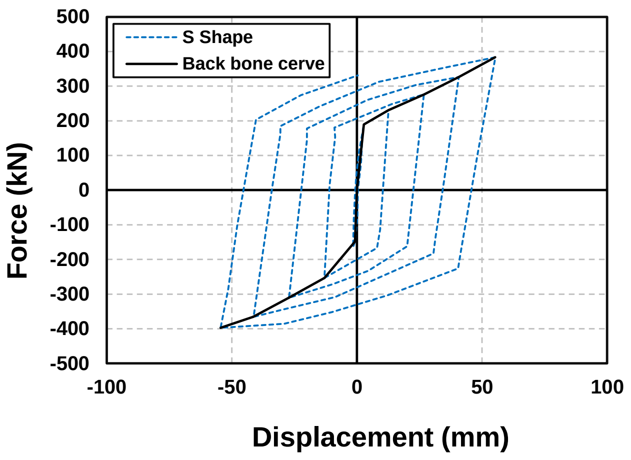
به منظور مقایسه سختی مهاربند پیشنهادی با مهاربند های مورد مطالعه ر ضوی نمودار بک بون هر کدام از مهاربند ها از روی نمودار هیسترزیس آنها رسم شده است شکل (۴-۲۲)تا (۴-۲۴).در ادامه و در شکل (۴-۲۲) میزان سختی اولیه مهاربند S شکل با مهاربند طول بلند مورد مقایسه قرار گرفته است.همانطور که مشاهده می شود میزان سختی اولیه مهاربند S شکل به مراتب بیشتر از مقدار سختی اولیه BRB است و این با توجه به تئوری های موجود در بحث مهاربند های کمانش تاب با طول کوتاه امری بدیهی بود، چرا که با کاهش طول مهاربند علی رغم احتمال وقوع خرابی خستگی کم سیکلی،سختی آنها افزایش می یابد(K=EA/L).

جدول (۴-۷) مقادیر سختی اولیه مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل و BRB

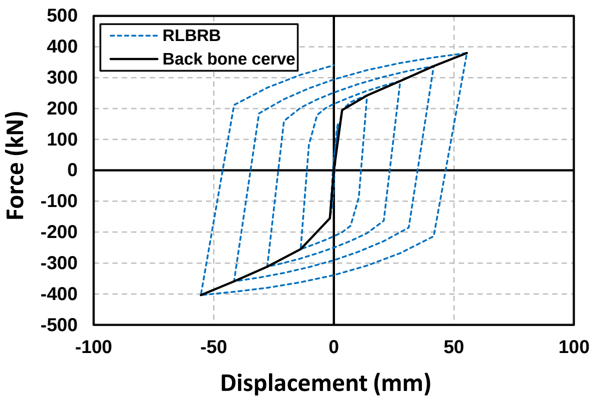
TYPE	Force (kN)	Displacement (mm)	Stiffness (Kn/mm)
S SHAPE CORE	۱۹۰	۲.۷۶	۶۸.۸۴۰۵۷۹۷۱
BRB	۱۳۴	۲.۸۷	۴۶.۶۸۹۸۹۵۴۷



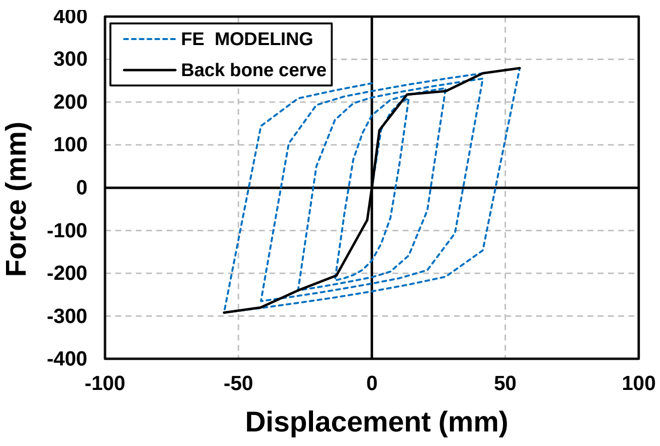
شکل (۴-۲۱) مقادیر سختی اولیه مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل و BRB



شکل (۴-۲۲) نمودار بک بون مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل



شکل (۴-۲۳) نمودار بک بون مهاربند RLBRB



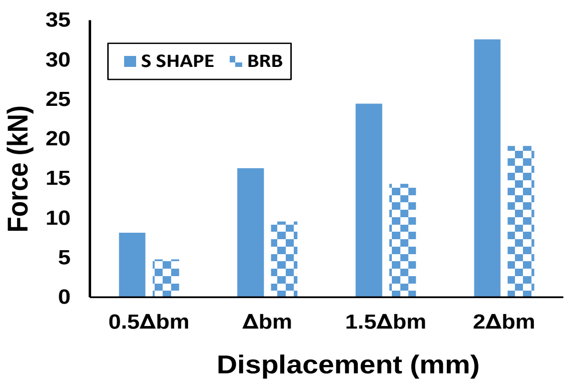
شکل (۴-۲۴) نمودار بک بون مدل آزمایشگاهی رضوی

۴-۸-۴- ارزیابی میزان شکل پذیری

همان طور که انتظار می رفت به دلیل طول کوتاهتر ناحیه ی تسلیم شونده در مهاربندS شکل، شکل پذیری در ناحیه ی تسلیم شونده ی آن چند برابر شکل پذیری در BRBهای مرسوم می باشد. مقادیر به دست آمده با تحقیقات پیشین در زمینه ی کوتاه تر کردن طول تسلیم شونده، همخوانی دارد [29]. به نظر می رسد که با توجه به شکل پذیری بالای مصالح فولاد (بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ برای فولادهای رده های مختلف) تأمین این حدود شکل پذیری کاملا امکان پذیر است به شرطی که معیار خستگی کم سیکلی هم کنترل شود. چرا که همان طور که پیشتر هم ذکر شد، عمر خستگی یک نمونه نه فقط به حداکثر کرنش بلکه به تاریخچه ی کرنشی بستگی دارد که نمونه تحمل می کند. نتایج شکل پذیری در جدول (۴-۸) و شکل (۴-۲۵) ارائه شده است.

جدول (۴-۸) مقادیر شکل پذیری مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل و BRB

مهاربندطول کوتاه با هسته S شکل				BRB			
CYCLE	EU (mm)	EY (mm)	μ(شکل پذیری)	CYCLE	EU (mm)	EY (mm)	μ(شکل پذیری)
0.5Δbm	۱۳.۸۵	۱.۷	۸.۱۴۷۰۵۸۸۲۴	۰.۵Δbm	۱۳.۸۵	۲.۹	۴.۷۷۵۸۶۲۰۶۹
Δbm	۲۷.۷	۱.۷	۱۶.۲۹۴۱۱۷۶۵	Δbm	۲۷.۷	۲.۹	۹.۵۵۱۷۲۴۱۳۸
1.5Δbm	۴۱.۵۵	۱.۷	۲۴.۴۴۱۱۷۶۴۷	۱.۵Δbm	۴۱.۵۵	۲.۹	۱۴.۳۲۷۵۸۶۲۱
2Δbm	۵۵.۴	۱.۷	۳۲.۵۸۸۲۳۵۲۹	۲Δbm	۵۵.۴	۲.۹	۱۹.۱۰۳۴۴۸۲۸



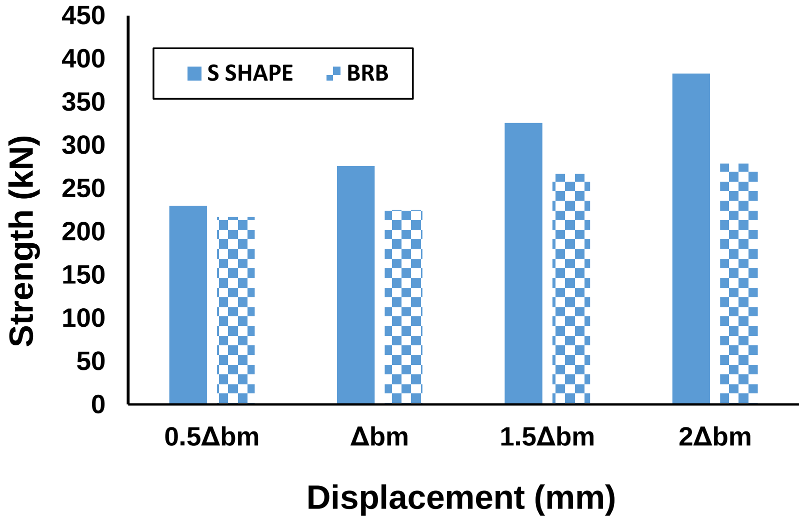
شکل (۴-۲۵) مقادیر شکل پذیری مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل و BRB

۴-۸-۵- ارزیابی مقاومت

برای ارزیابی و مقایسه مقاومت مهاربند پیشنهادی و مهاربندBRB نیز از نمودار های بک بن تهیه شده در بخش (۴-۸-۳) ا ستفاده شده ا ست. از آنجایی که تفاوت چندانی بین مقادیرFy در دو بخش ک شش و ف شار م شاهده نمی شود لذا فقط یکی از حالات انتخاب ومورد برر سی قرار گرفته ا ست. و همچنین به دلیل مشابهت های فراوان در نمودار هیسترزیس مهاربند پیشنهادی و RLBRB از مقایسه این دو صرفنظر شده است. همانطور که از نتایج بر می آید میزان مقاومت مهاربند S شکل به واسطه شکل هندسی و طول کوتاهش به مراتب بیشتر از مهاربند BRB است.

جدول (۴-۹) ارزیابی مقاومتی مهاربند طول کوتاه با هستهs شکل

	مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل	BRB	
CYCLE	Fu (kN)	Fu (kN)	درصد اختلاف
0.5Δbm	۲۳۰	۲۱۷	۰.۰۵۹۹۰۷۸۳۴
Δbm	۲۷۶	۲۲۵	۰.۲۲۶۶۶۶۶۶۷
1.5Δbm	۳۲۶	۲۶۷	۰.۲۲۰۹۷۳۷۸۳
2Δbm	۳۸۳	۲۷۹	۰.۳۷۲۷۵۹۸۵۷



شکل (۴-۲۶) ارزیابی مقاومتی مهاربند طول کوتاه باهسته S شکل

۴-۸-۶- محاسبه مقادیر Δ_{by} و Δ_{bm}

برای محاسبه پارامتر های فوق از روابط زیر استفاده می شود:

$$\Delta_{bm} = \frac{b}{2L} * \Delta_m \qquad (۱۶)$$

b دهانه تحت پوشش مهاربند، L طول کلی مهاربند و تغییر شکل متناظر با دریفت طراحی طبقه

$$\sigma = \frac{F}{A} \rightarrow F = 248*80*10 = 198 \quad (KN)$$

$$\Delta_{by} = \frac{198}{119} = 1.7\,(mm)$$

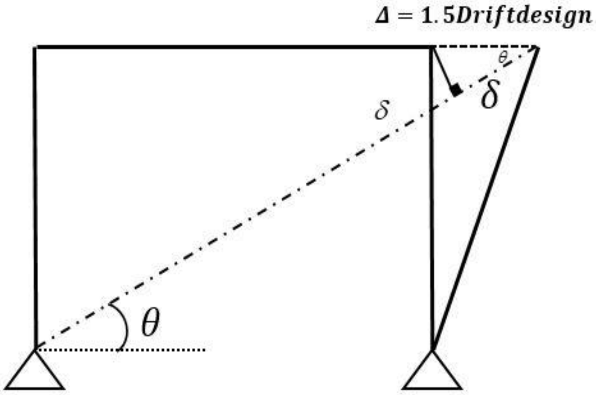
مقدار دریفت طراحی طبقه به طور محافظه کارانه ۱,۵٪ انتخاب گردیده اســـت.در نتیجه مقدار Δ_{bm} برابر ۲۸,۸ میلی متر خواهد شد.

برای محاسبه سختی محوری اعضا با سطح مقطع متغیر از رابطه (۱۷) استفاده می شود.

$$K = \frac{E}{\int_0^1 \frac{dx}{A(X)}} \qquad (۱۷)$$

که درآن A(X) سطح مقطع ناحیه هسته با مقطع متغیر و E مدول الاستیسیته است.در این پژوهش K=119 کیلو نیوتن برمیلیمتر حاصل شد.

رابطه (۱۶) براساس شکل (۴-۲۷) بدست آمده است.



شکل (۴-۲۷) نحوه تغییر شکل مهاربند طول کوتاه

$$\cos\theta = \frac{\delta}{1.5DriftDesign} \Rightarrow \delta = \frac{b}{2L}*(1.51.5DriftDesign) \Rightarrow \Delta_{bm} = \frac{b}{2L}*\Delta m$$

۴-۸-۷- ارزیابی معیار های پذیرش مهاربند پیشنهادی

- منحنی بار-تاریخچه ی جابجایی باید نشانگر رفتار پایدار و قابل تکرار به همراه سختی مثبت افزاینده باشد.
- هیچ نوع شکست، ناپایداری مهاربند یا خرابی اتصال انتهایی مهاربند نباید مشاهده شود.
- در چرخه های با تغییر شکل بزرگتر از Δ_{by} ، نسبت نیروی فشاری حداکثر به نیروی کششی حداکثر نباید بزرگتر از ۱,۳ باشد.
- در چرخه های با تغییر شکل بزرگتر از Δ_{by} ، حداکثر نیروی کششی و فشاری نباید کمتر از مقاومت اسمی هسته باشد.

حال به بررسی تک تک موارد ذکر شده می پردازیم.

همانطور که در بخش های پیش ملاحظه شد نمودار هیسترزیس مهاربند پیشنهادی رفتاری پایدار در کشش و فشار از خود نشان داد.که این نشان دهنده عملکرد مطلوب مهاربند پیشنهادی می باشد.

به منظور بررسی مورد دوم برای تمامی دامنه های کرنشی بزرگتر از Δ_{by} مقادیرکمی Pmax وTmax در جدول(۴-۱۰) زیر آمده است همانطور که ملاحظه می شود این بند نیز اقناع شده است.

جدول (۴-۱۰) نسبت نیروی فشاری حداکثر به نیروی کششی حداکثر

دامنه کرنشی	Pmax (kN)	Tmax (kN)	نسبت(pmax/tmax)
0.5Δbm	۴۲۴.۷	۲۳۰.۵	۱.۱
Δbm	۳۱۰.۵	۲۷۶.۲	۱.۱۲
1.5Δbm	۳۶۵.۲	۳۲۶.۴	۱.۱۲
2Δbm	۳۹۷.۲	۳۸۳.۵	۱.۰۳

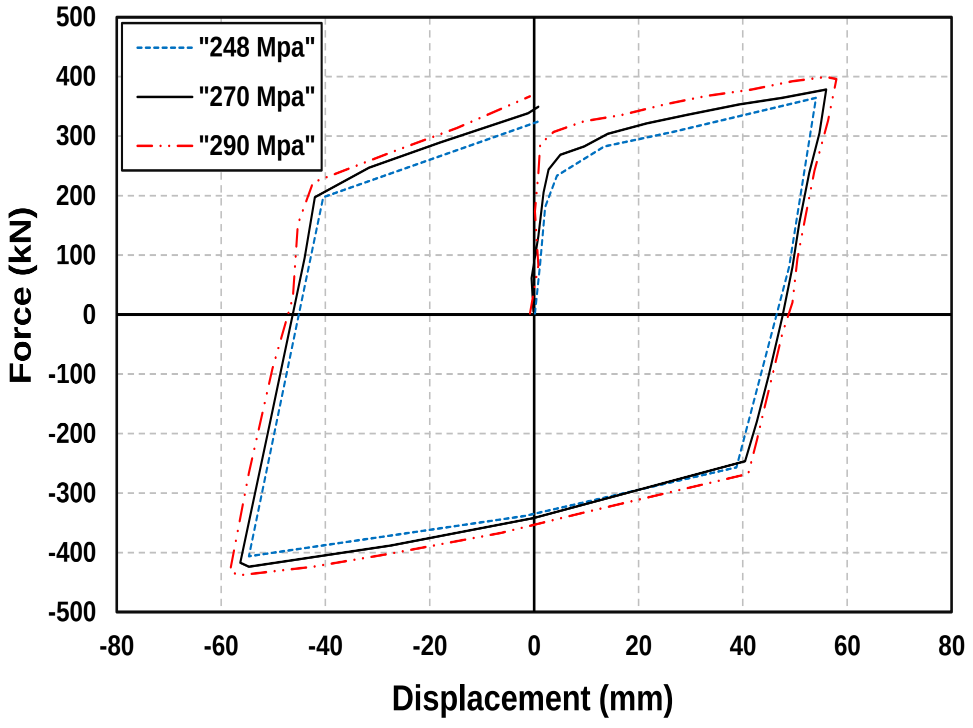
و برای بررسی مورد آخر از انجا که مقاومت اسمی هسته برابر۳۶۵ مگا پاسکال است لذا همانطور که از جدول (۴-۱۰) مشخص است فقط دامنه آخر اقناع نشده است. از آنجایی که در صد تفاوت دو مقدار

در حد قابل قبول (زیر ۱۰ در صد) ا ست در نتیجه قابل قبول ا ست. پس از نتایج اینگونه بردا شت می شود که مهاربند پیشنهادی به خوبی توانسته است معیار های پذیرش را تا حد قابل قبولی اقناع نماید.

۴-۸-۸- ارزیابی اثر تنش تسلیم برروی نمودار هیسترزیس

شکل (۴-۲۸) تأثیر تغییر تنش تسلیم هسته در نمودار هیسترزیس بار - تغییر شکل را نشان می دهد. می توان خاطرنشان کرد که افزایش تنش عملکرد (Fy) باعث ایجاد نیروهای واکنش بالاتر می شود. این را می توان به این واقعیت نسبت داد که با افزایش تنش عملکرد ، بار عملکرد افزایش می یابد که از طریق معادله(۱۸) توجیه می شود.

$$P_y = F_y * A \quad (۱۸)$$

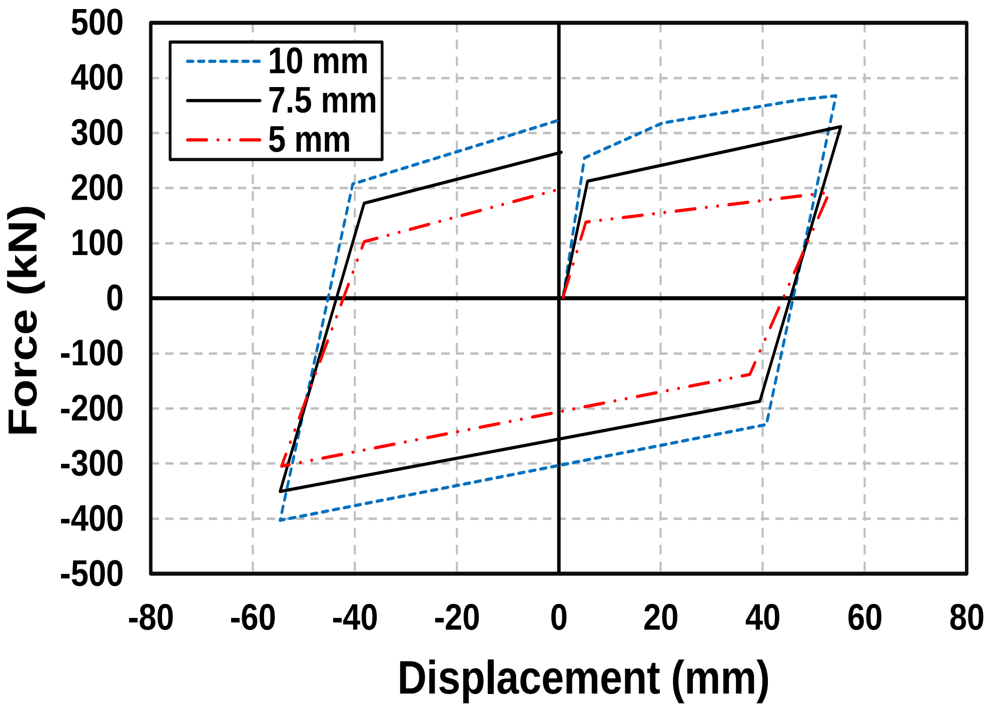


شکل (۴-۲۸) تاثیرات تنش تسلیم بروی نمودار هیسترزیس

۴-۸-۹- ارزیابی اثر ضخامت هسته برروی میزان استهلاک انرژی

شکل (۴-۲۹) تأثیر تغییر ضخامت هسته در نمودار هیسترزیس را نشان می دهد. می توان بیان نمود که افزایش ضخامت هسته باعث ایجاد نیروهای واکنش بالاتر می شود.

این با مقایسه شیب قسمت الاستیک مشخص است. افزایش ضخامت هسته باعث افزایش سطح مقطع هسته می شود که منجر به افزایش سختی BRB می شود. در نتیجه ، BRB سخت تر با h (بزرگتر) دارای مقاومت بزرگتری بوده که خود سبب تحمل نیروی بیشتری می شود.



شکل (۴-۲۹)　اثر ضخامت هسته برنمودار هیسترزیس

باتوجه به شکل (۴-۲۹) می توان نشان داد که افزایش ضخامت هسته باعث افزایش انرژی هیسترزیس مهاربند می شود.

۴-۹- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل با استفاده از مدل سازی اجزا محدود، نمونه پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله پارامترهای تاثیرگذار در رفتار مهاربند های کمانش تاب پارامترهای نوع مصالح مصرفی، نحوه اتصالات و میزان اصطکاک می‌باشد. در این مطالعه علاوه بر راستی آزمایی نتایج آزمایشگاهی مهاربند های کمانش تاب با طول کوتاه و بلند، مدل تحلیل مهاربند پیشنهادی بررسی و نتیجه به گونه ای بود که با مهاربند طول کوتاه بسیار شبیه بودند اما مهاربند طول بلند محدودیت هایش سبب برتری مهاربند S شکل نسبت به آن شد.

فصل ۵:

جمع بندی و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

در این تحقیق به بررسی عملکرد لرزه ای مهاربند کمانش تاب طول کوتاه با هسته S شکل پرداخته شده است و سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و استهلاک انرژی آن با مدل های آزمایشگاهی مقایسه شده است. در این راستا از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است.

در فصل یک به شرح مختصری از موضوع تحقیق و اهمیت آن، نوآوری‌ها و اهداف آن پرداخته شد. در فصل دوم ضمن توضیحاتی اجمالی در خصوص مهاربند های کمانش تاب متدوال، به مروری بر تحقیقات انجام‌شده در این زمینه پرداخته شد. در فصل سوم ضمن آشنایی با روش تحلیل اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس، به‌منظور صحت‌سنجی کردن، از مدل آزمایشگاهی ارياشار و رضوی استفاده شده است. در فصل چهارم به بررسی سختی، مقاومت، شکل‌پذیری ، استهلاک انرژی و اثر خستگی کم سیکلی مهاربند پیشنهادی پرداخته و در این فصل نتایج جمع‌بندی و پیشنهادهایی برای ادامه کار تحقیقاتی شده است.

۵-۲- جمع بندی و نتیجه گیری

مهاربند پیشنهادی با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS مدلسازی شد تا عملکرد آن تحت پروتوکل بارگذاری AISC Seismic Provisions۲۰۰۵ بررسی و نقاط قوت و ضعف آن مشخص شود. نتایج تحلیل چرخه ای مشخص کرد که:

۱) مهاربند پیشنهادی تا انتهای تحلیل پاسخ چرخه ای پایدار و بدون افت بار از خود نشان میدهد.

۲) هیچ گونه کمانش کلی مهاربند، گسیختگی در هسته مشاهده نشد.

۳) برقراری تماس مستقیم بین هسته و مکانیزم مقید کننده در جهت ضعیف به همراه استفاده ازعامل جدا کننده در نواحی تماس، در کنترل کمانش های موضعی هسته بسیار مؤثر می باشد و توزیع کرنش یکنواختی در آن ایجاد می کند.

۴) مشکل سازه های شکل پذیر از جمله BRBFها، عمدتا سختی کم در ناحیه ی غیر الاستیک می

باشد. استفاده از مهاربند پیشنهادی در قاب های BRBF ضمن حفظ شکل پذیری مورد نیاز، سختی پس از تسلیم قابل توجهی ایجاد می کند. بدین ترتیب مشکل افزایش دریفت غیر الاستیک در این سیستم ها حذف می شود.

۵) در بررسی اثر خستگی کم سیکلی مشاهده شد که مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل تا پایان پروتکل بارگذاری استاندارد AISC341 دچار گسیختگی نمی شود.

در یک نتیجه گیری کلی، می توان مهاربند مقید در برابر کمانش پیشنهاد شده را دارای افق مناسبی برای اجرا و دارای مطلوبیت نسبت به BRBهای متداول و حتی BRBهای تمام فولادی قملداد کرد.

۵-۳- پیشنهادها برای تحقیقات آینده

با بررسی‌های انجام‌شده در این تحقیق موضوعات زیر برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود:

- به منظور تایید عملکرد این نوع مهاربند، نیاز است نمونه آزمایشگاهی ساخته و با در نظر گرفتن ضوابط آیین نامه ی AISC Seismic provisions 2005 تست شود.
- بررسی رفتار مهاربند کمانش تاب با هسته S شکل، تحت مکانیزم غلاف متفاوت از جمله CFRP.
- با توجه به عدم قطعیت در مقدار دقیق ضریب اصطکاک به هنگام استفاده از مصالح جدا کننده ی مختلف، می بایست حساسیت سنجی روی این مقدار صورت پذیرد و عملکرد مهاربند مورد ارزیابی قرار گیرد.
- استفاده از مصالح نوین از جمله آلیاژهای حافظه دار برای بخش هسته و بررسی عملکرد لرزه ای مهاربند.
- بررسی ضریب رفتار مهاربند پیشنهادی

مراجع

مراجع

[1] ازهری، میرقادری، (۱۳۹۱)، " طراحی سازه‌های فولادی - مباحث طراحی لرزه‌ای"، کتاب، جلد چهارم، انتشارات ارکان دانش

[2] P. Clark, Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices, in: International Post-SMiRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Korea, 1999.

[3] ASCE (2016), Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-16, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

[4] R.A. Kersting, L.A. Fahnestock, W.A. López, Seismic Design of Steel Buckling-Restrained Braced Frames, NIST GCR, (2015) 15-917.

[5] Uang, C.M., Nakashima, M., Bozorgnia, Y. and Bertero, V.V. "Steel bucklingrestrained frames." CRC Press, chapter 16. (2003).

[6] AISC. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings including Supplement No.1. AISC-341, American Institute of Steel Construction, (2005).

[7] M.E. Eryaşar, C. Topkaya, An experimental study on steel-encased buckling-restrained brace hysteretic dampers, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 39(5) (2010) 561-581.

[8] داوران،ع. حسن زاده، ج. رفیع زاده، ۱۳۸۷. "بررسی تاثیر Imperfection و Strain Hardening دررفتار قاب های دارای مهاربند BRB و SCBF". فصلنامه علمی تخصصی مهندسی عمران سازه.

[9] شارع سیدمصطفی،شاهبختی ناصر، قلعه نویی منصور، ۱۳۸۷. "بررسی و مقایسه رفتار لرزه ای سیستمBRB و دو سیستم باربر لرزه ای رایج". مقالات چهارمین همایش ملی نگرشی بر آئین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله(استاندارد ۲۸۰۰).

[10] S. Ahlehagh, Improvement of the Special Concentrically Braced Steel Frames Behavior by Employing Balanced Braces, Master of Science Thesis, University of Tehran, (2008).

[11] S.A.R. Tabatabaei, S.R. Mirghaderi, A. Hosseini, Experimental and numerical developing of reduced length buckling-restrained braces, Engineering Structures, 77 (2014) 143-160.

[12] A. Watanabe, Y. Hitomi, E. Saeki, A. Wada, M. Fujimoto, Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube, in: Proceedings of ninth world conference on earthquake engineering, 1988, pp. 719-724.

[13] M. D'Aniello, G. Della Corte, F. Mazzolani, All-steel buckling-restrained braces for seismic upgrading of existing reinforced concrete buildings, Proc. STESSA, 2009 (2009).

[14] C.-C. Chou, S.-Y. Chen, Subassemblage tests and finite element analyses of sandwiched buckling-restrained braces, Engineering Structures, 32(8) (2010) 2108-2121.

[15] M. Ansari, Numerical and Experimental Study of Buckling Restrained Braces, in, Master of Science in Civil Engineering, Uinversity of Tehran, 2010.

[16] C.-L. Wang, T. Usami, J. Funayama, Evaluating the influence of stoppers on the low-cycle fatigue properties of high-performance buckling-restrained braces, Engineering Structures, 41 (2012) 167-176.

[17] S. Razavi, S. Mirghaderi, A. Hosseini, M. Shemshadian, Reduced length buckling restrained brace using steel plates as restraining segment, in: Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012.

[18] C.-C. Chou, S.-Y. Chen, Subassemblage tests and finite element analyses of sandwiched buckling-restrained braces, Engineering Structures, 32(8) (2010) 2108-2121.

[19] R. Tremblay, P. Bolduc, R. Neville, R. DeVall, Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems, Canadian Journal of Civil Engineering, 33(2) (2006) 183-198.

[20] Q. Chen, S. Bensamoun, J.R. Basford, J.M. Thompson, K.-N. An, Identification and quantification of myofascial taut bands with magnetic resonance elastography, Archives of physical medicine and rehabilitation, 88(12) (2007) 1658-1661.

[21] F. Genna, P. Gelfi, Analysis of the lateral thrust in bolted steel buckling-restrained braces. I: Experimental and numerical results, Journal of structural engineering, 138(10) (2011) 1231-1243.

[22] A. Zsarnoczay, Experimental and numerical investigation of buckling restrained braced frames for Eurocode conform design procedure development, (2013).

[23] Saeki, E., Maeda, Y., Nakamura, H., Iwamatsu, K., and Wada, A. “Analytical study on unbonded braces fixed in a frame." Journal of Structural and Constructional Engineering, Architectural Institute of Japan, (1996).

[24] S.A. Razavi, A. Kianmehr, A. Hosseini, S.R. Mirghaderi, Buckling-restrained brace with CFRP encasing: Mechanical behavior & cyclic response, Steel and Composite Structures, 27(6) (2018) 675-689.

[25] سروش نیا، بهشتیان، (۱۳۹۵)، " کاملترین مرجع کاربردی Abaqus"، کتاب، سطح پیشرفته، انتشارات نگارنده دانش

[26] J.E. Shigley, Shigley's mechanical engineering design, Tata McGraw-Hill Education, 2011.

[27] Sabelli, R., Pottebaum, W., Brazier, C. and López, W. “Design of a BucklingRestrained Braced Frame Utilizing 2005 Seismic Standards.” ASCE Structures,(2005).

[28] Karimi, S., Arbabi, F., "Seismic Evaluation and Cyclic Testing of BucklingRestrained Braces Manufactured in Iran.” Proc. of The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Bejing, China, (2008).

[29] Di Sarno, L., Manfredi, G., "Seismic retrofitting with buckling restrained braces: Application to an existing non-ductile RC framed building."Soil Dynamics and Earthquake Engineering, (2010)

[30] شمشادیان، م. ۱۳۸۹ ."ارائه طرح جدید مهاربند مقید در برابر کمانش با ایده حذف غلاف سرتاسری" پایان‌نامه ارشد . دانشگاه تهران

[31] R. Sabelli, S. Mahin, C. Chang, Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces, Engineering Structures, 25(5) (2003) 655-666.

[32] S. Razavi, M. Shemshadian, S. Mirghaderi, S. Ahlehagh, Seismic design of buckling restrained braced frames with reduced core length, in: The Structural Engineers World Congress, 2011.

[33] M. Iwata, M. Muraim, T. Nakagomi, Experimental study on brittle fracture of buckling-restrained braces influences of core plate welding specifications and experimental temperatures, in: International Specialty Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Area (STESSA), 2012.

[34] C. Tsai, Y. Lin, W. Chen, H. Su, Mathematical modeling and full-scale shaking table tests for multi-curve buckling restrained braces, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 8(3) (2009) 359-371.

[35] T. Usami, C. Wang, J. Funayama, Low-cycle fatigue tests of a type of buckling restrained braces, Procedia Engineering, 14 (2011) 956-964.
[36] G. Palazzo, F. López-Almansa, X. Cahís, F. Crisafulli, A low-tech dissipative buckling restrained brace. Design, analysis, production and testing, Engineering Structures, 31(9) (2009) 2152-2161.
[37] M. Iwata, M. Murai, Buckling-restrained brace using steel mortar planks; performance evaluation as a hysteretic damper, Earthquake engineering & structural dynamics, 35(14) (2006) 1807-1826.
[38] H. Nakamura, T. Takeuchi, Y. Maeda, Y. Nakata, T. Sasaki, M. Iwata, A. Wada, Fatigue properties of practical-scale unbonded braces, Nippon steel technical report, 82(0) (2000).

ABSTRACT:

The use of steel braces in buildings with a bending seismic system can substantially control the lateral displacement of this system. BRBs by removing the buckling at high pressure have eliminated the problem of conventional braces, but cases such as overweight, high price and rigid performance have led to the introduction of a new type of RLBRB reduced length buckling restraned brace. Effortless. In this research, we introduce an innovative idea called S-core reduced length buckling restraned brace which, despite its short length, can eliminate some of the problems of the BRB system while also acting as a passive control system.

Therefore, first the analytical models of RLBRB and BRBs braces in ABAQUS finite element software are validated based on the experimental results of previous researchers.Then, according to the results of the analysis, the characteristics of the S-core reduced length buckling restraned brace are compared with the RLBRB and BRB braces.

The results show the improvement of the values of the initial hardness, ductility, strength, and energy dissipation parameters in the S-shaped reduced length buckling restraned brace compared to the BRB brace. Examination of the effect of low-cycle fatigue shows that the proposed brace was able to remain stable without failure until the end of the AISC341 standard loading protocol.

Keywords: Passive control system، Buckling restraned brace، S-shaped core، Low-cycle fatigue ، Energy dissipation

Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Structural Engineering

Analytical investigation of seismic performance of a reduced length buckling restraned brace (RLBRB) with new detailing

By:

Reza Tahmasbi

Supervisor:

Dr. Jalil Shafaei

September 2019