نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۶، سال ۱۴۰۰، صفحات ۲۴۵۱ تا ۲۴۷۴
DOI: 10.22060/ceej.2020.17407.6554

بررسی تحلیلی عملکرد لرزه ای مهاربند کمانش تاب با طول کوتاه دارای هسته S شکل

رضا طهماسبی، جلیل شفایی*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران

خلاصه: استفاده از مهاربندهای فولادی در ساختمان‌های با سیستم لرزه بر قاب خمشی می تواند به طور قابل ملاحظه ای تغییر مکان جانبی این سیستم را کنترل کند. یکی از ایرادهای سیستم مهاربندی متداول، کمانش آن‌ها در بارهای فشاری است که میزان استهلاک انرژی سازه را کاهش می دهد. مهاربندهای کمانش تاب (BRBs) با حذف کمانش کلی 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 کمانش تاب با نام مهاربند کمانش تاب طول کوتاه RLBRB گردیده است. با این وجود در مهاربندهای RLBRB به دلیل حاکم شدن پدیده خستگی کم سیکلی نمی توان طول مهاربند را بیش از حد کاهش داد تا بتوان به عنوان یک سیستم غیر فعال بعد از زلزله قابلیت تعویض داشته باشد. در این تحقیق یک ایده جدید و نوآورانه به نام مهاربند کمانش تاب طول کوتاه با هسته S شکل معرفی می گردد که علی رغم طول بسیار کوتاه می‌تواند عملکردی مشابه سیستم RLBRB و BRB داشته باشد و در عین حال به عنوان یک سیستم کنترل غیر فعال عمل کند. لذا ابتدا مدل‌های تحلیلی مهاربندهای RLBRB و BRBs را در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS بر اساس نتایج آزمایشگاهی محققین گذشته صحت سنجی می‌کنیم. سپس طبق نتایج حاصل از تحلیل، مشخصات مهاربند کمانش تاب طول کوتاه با هسته S شکل با مهاربندهای RLBRB و BRB مقایسه می‌گردد. نتایج حاصل از مقایسه طرح پیشنهادی با مهاربندهای کمانش تاب متداول بیانگر این است که علی رغم کوچک‌تر و سبک‌تر بودن این مهاربندها رفتاری مشابه مهاربندهای BRB متداول دارند.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۹
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵

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

۱- مقدمه

با توجه به خسارتهای ناشی از زلزلههای گذشته در ایران و جهان بر روی ساختمان‌های فولادی لزوم توجه و استفاده از سیستمهای نوین لرزهای به منظورکاهش خسارت و افزایش سرعت برگشت سازه به حالت اولیه ضروری است. با وجود انواع سیستم های باربر جانبی، قاب های مهاربندی شده با مهاربندهای کمانشتاب (BRBFs)[1] به دلیل داشتن سختی بالا، جذب انرژی مطلوب، رفتار چرخه ای (هیسترزیس) پایدار، جایگاه ویژهای را در سیستمهای مقاوم لرزهای به خود اختصاص داده اند [۱-۴]. قابهای مهاربندی کمانشتاب (BRBFs) به طور گستردهای بعد از زلزله های کوبه در ژاپن و نورثریج در امریکا مورد استفاده قرار گرفتند [۶ و ۵ و ۳]. این قابها نوع خاصی از قابهای مهاربندی همگرا هستند که از کمانش کلی مهاربند در آن‌ها با تمهیدات خاصی جلوگیری شده است. مقایسه رفتاری مهاربند کمان شتاب و مهاربند همگرای متداول در یک سیکل بارگذاری در شکل (۱) نشان داده شده است.

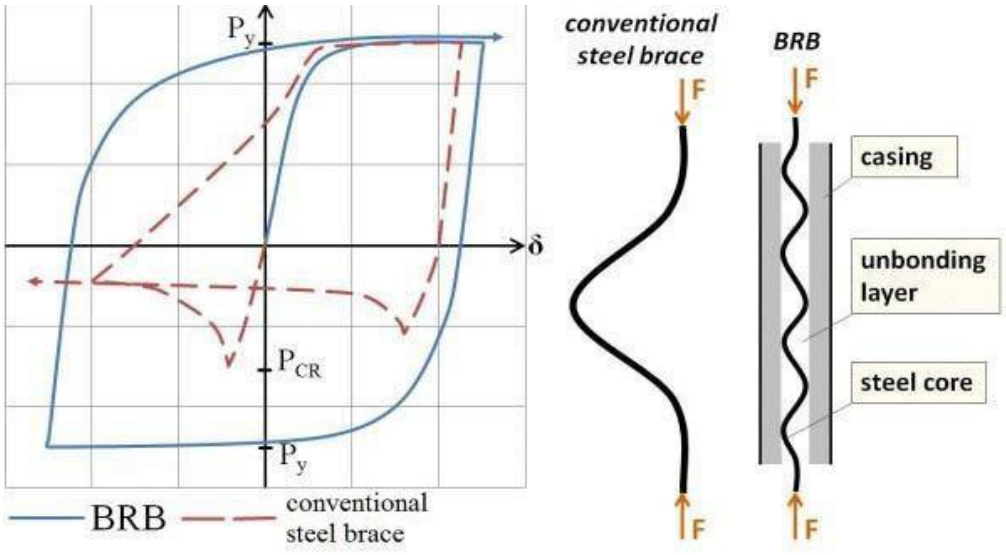
در مطالعه ای که توسط کلارک و همکاران به روی عملکرد لرزهای قاب خمشی ویژه و BRBFs انجام گرفت، نتایج بیانگر کاهش ۵۰ درصدی وزن کل فولاد در BRBFs نسبت به SMRFs[2]، سختی جانبی بیشتر و مقاومت تسلیم کمتر BRBFs نسبت به SMRFs و همچنین کوچک‌تر بودن اضافه مقاومت آن‌ها نسبت به SMRFs بود [۷]. در مطالعه صورت گرفته توسط س‌ابلی و همکاران به روی عملکرد لرزهای BRBs و قابهای مهاربندی معمولی V شکل معکوس، نتایج بیانگر رفتار بهتر BRBs نسبت به قاب های همگرای معمولی و قاب خمشی بود و همچنین دریفت پسماند BRBFs حدود ۴۰ ٪ تا ۶۰ ٪ دریفت ماکزیمم قاب معمولی به

1 Buckling Restrained Brace Frames

2 Special Moment Resisting Frames

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: jshafaei@shahroodut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.



شکل ۱. مقایسه رفتار مهاربند کمانش تاب و مهاربند متداول [۷]

Fig. 1. Comparison of buckling restrained bracing behavior with conventional bracing

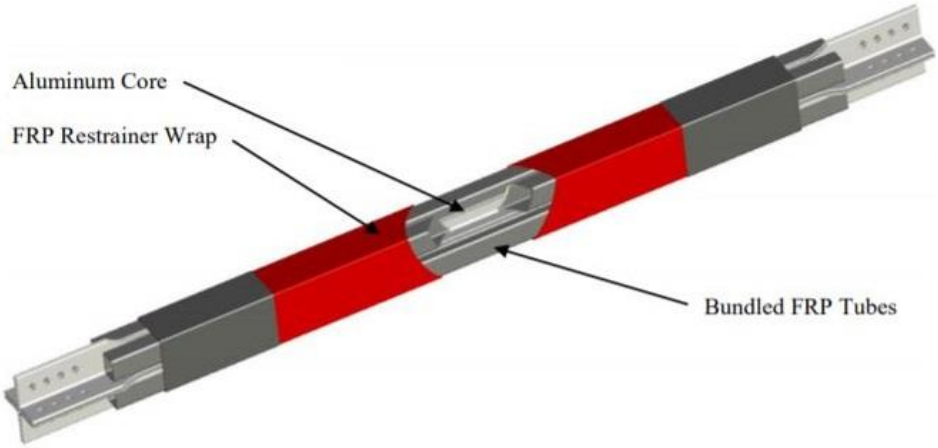
دست آمد [۸]. از همین رو باید اشاره نمود که به واسطه عدم کمانش کلی این مهاربندها، دیوار غیرسازهای اطراف آن دچار آسیب نخواهد شد. این مهاربندها دارای روند مدل‌سازی آسان در نرم افزارهای طراحی‌اند و می‌توان برای آن‌ها از تحلیل های خطی استفاده نمود. نکته حائز اهمیتی که در این مهاربندها وجود دارد عدم نیاز به نگهداری در طول عمر ساختمان است. مهاربندهای کمانشتاب دارای معایبی از جمله وزن بالا و قیمت زیاد در مقایسه با سایر سیستمهای مهاربندی متداول هستند. از جمله محدودیت های این مهاربنده می‌توان به ظهور تغییر شکلهای ماندگار در زلزله های بزرگ اشاره نمود. یکی دیگر از محدودیت های این مهاربندها عدم امکان بازرسی پس از زمین لرزه های شدید است در ضمن اینکه در صورت صدمه دیدن این مهاربندها در پس لرزهها عمل نخواهند کرد. جهت مرتفع نمودن مشکلات موجود BRBs و طراحی بهینه به منظور استفاده حداکثری از قابلیت استهلاک انرژی این مهاربندها ، می‌توان برروی دو پارامتر سختی و مقاومت تمرکز نمود. جهت افزایش مقادیر کمی این پارامترها و با در نظر گرفتن رفتار مستقل آن‌ها نسبت به یکدیگر دو روش افزایش سطح مقطع و کاهش طول هسته پیشنهاد می‌گردد [۹].

در این پژوهش به منظور طراحی بهینه، ملاحظات تغییر نوع سطح مقطع و کاهش طول هسته برای یک مهاربند کمانش‌تاب تمام فولادی پیشنهاد میگردد. دوسیکا و همکارانش به منظور کاهش وزن BRBs استفاده از مصالح سبک‌تر از جمله هسته آلومینیومی را پیشنهاد دادند [۱۰]. جزئیات طرح پیشنهادی آن‌ها در شکل ۲ ارائه گردیده است.

مهاربندهای کمانشتاب با طول کوتاه (RLBRBs)[1]که نقش فیوز سازه‌ای را ایفا می‌کنند، به راحتی قابلیت نصب و جایگزینی بعد از زلزله را دارا هستند و برخلاف BRBs فضای بسیار کمتری را اشغال نموده و وزن کمتری نیز دارند. قابل ذکر است که RLBRBs عملکرد لرزهای بهتری نسبت به BRBs دارند [۱۱]. مطالعات آزمایشگاهی که توسط میرطاهری و همکاران به منظور بررسی پاسخ کلی RLBRBs صورت گرفت، بیانگر استهلاک انرژی بالای این مهاربندها بود [۱۲]. هویدایی و همکاران نیز آنالیزهایی به صورت اجزا محدود بر روی رفتار کمانش کلی و موضعی RLBRBs انجام دادند [۱۴ و ۱۳]. رضوی و همکاران نوع جدیدی از مهاربندهای کمانشتاب تمام فولادی با طول هسته کاهش یافته را ارائه نمودند که مهاربند کمانشتاب با طول کوتاه نام گرفت (RLBRB) .نتایج آزمایشهای آن‌ها بیانگر افزایش احتمال خرابی خستگی کم سیکلی ناشی از کاهش طول هسته و به دنبال آن افزایش کرنش تا دامنه های ۴٪ تا ۵٪ بود. به منظور اعمال پدیده خستگی کم سیکلی از روابط کافین مانسون استفاده شد [۹].

با این وجود در مهاربندهای RLBRB به دلیل حاکم شدن پدیده

1 Reduced Length Buckling Restrained Braces



شکل ۲. مهاربند پیشنهادی دوسیکا و همکاران [۱۰]

Fig. 2. Suggested brace by Dosika et al.

خستگی کم سیکلی نمی توان طول مهاربند را بیش از حد کاهش داد تا بتوان به عنوان یک سیستم غیر فعال بعد از زلزله قابلیت تعویض داشته باشد. در این تحقیق یک ایده جدید و نوآورانه به نام مهاربند کمانشتاب طول کوتاه با هسته S شکل معرفی میگردد که علی رغم طول بسیار کوتاه میتواند برخی محدودیت‌های سیستم RLBRB و BRB را مرتفع کند و در عین حال به عنوان یک سیستم کنترل غیر فعال عمل کند.

لیانگ لی و همکاران در سال ۲۰۱۹ نوع جدیدی از مهاربندهای کمانش‌تاب با هسته متغیر (vcc) که از چند بخش تشکیل شده بود را معرفی نمودند. هدف آن‌ها بررسی رفتار مکانیکی و اعتبارسنجی روابط ریاضی حاکم بر مهاربند پیشنهادی بود. آن‌ها ۶ نمونه را مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که هیچ یک از نمونه ها تحت بارهای فشاری دچار کمانش نشدهاند و میزان استهلاک انرژی و شکل پذیری نیز راضی کننده بود. همچنین روابط ارائه شده حاکم بر طراحی نیز از اعتبار کافی برخوردار بود [۳۰].

هویدایی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۵ مطالعه عددی را بر روی یک مهاربند کمانشتاب با طول کوتاه تمام فولادی انجام دادند. هدف آن‌ها بررسی رفتار لرزه ای مهاربند پیشنهادی به منظور امکان پذیر بودن این نوع از مهاربندها و همچنین مقایسه دریفت طراحی طبقه مهاربند طول کوتاه با مهاربندهای متداول بود. نتایج نشان داد که مهاربند پیشنهادی به طور جزئی می‌تواند دریفت طراحی طبقه را کاهش دهد بدون آنکه از حدود مجاز عمرخستگی کمسیکلی گذر کرده باشد. حداقل طول هسته مهاربند، بر اساس عمر خستگی کم سیکلی در نظر گرفته شده بود [۳۱].

رضوی و همکاران در سال ۲۰۱۸ ایده استفاده از لایه CFRP [1] را به جای غلاف فولادی پیشنهاد نمودند. به منظور بررسی عملکرد لرزه ای مهاربند پیشنهادی ۲ نمونه از مهاربند ساخته شد و تحت زلزله های سطح خطرMCE[2] و DBE[3] قرار گرفتند. نتایج نشان داد که لایه‌های CFRP به طور موثری عملکرد مورد انتظار از غلاف را فراهم آورده است در عین حال که مهاربند پیشنهادی جایگزین مناسبی برای مهاربندهای متداول خواهد بود [۳۲].

۲- مشخصات کارهای آزمایشگاهی مهاربند کمانش تاب طول کوتاه (RLBRB) رضوی به منظور صحت سنجی

در این بخش به منظور راستی آزمایی و همچنین داشتن معیار قابل استناد آزمایشگاهی برای طرح پیشنهادی، مطالعه انجام شده توسط رضوی وهمکاران [۹] مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش فولاد مورد استفاده برای کلیه اعضا به گونهای انتخاب گردیده است که به راحتی قابل دسترس باشد. به منظور اتصال دو غلاف به یکدیگر از اتصال پیچی استفاده شده است. این نوع اتصال علی رغم اینکه بازرسی هسته بعد از زلزله را امکان پذیر می‌سازد، این حسن را نیز دارد که بعد از تعویض هسته آسیب دیده مجددا استفاده گردد. نحوه اتصال BRB به اعضای مجاور خود به صورت صلب در نظر گرفته شده است. جزئیات بخش‌های مختلف مهاربند در ادامه

1 Carbon fiber reinforced polymer
2 maximum considered earthquake
3 design basis earthquake

بیان‌می‌گردد.

۲- ۱- هسته

حداکثر ظرفیت کششی دستگاه آزمایش برابر ۵۰۰ کیلو نیوتن می‌باشد و انتخاب سطح مقطع هسته بر اساس همین مقدار صورت گرفته است. از این رو یک ورق با سطح صاف با ابعاد ۱۰×۸۰ میلی‌متر مربع از فولاد(DIN17100) ST 37-2 با مقاومت تسلیم اسمی ۲۳۵ و مقاومت نهایی ۳۶۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. اما نتایج به دست آمده برای فولاد مورد نظر در آزمایش کوپان بر اساس استاندارد ASTM A270 [۱۵] مقادیر مقاومت تسلیم نمونه را برابر ۲۴۸ و مقاومت نهایی آن را ۴۰۲ مگاپاسکال گزارش می دهد. طول هسته به گونه‌ای 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 (۳) و (۴) که در ادامه ذکر می‌شوند و با فرض دریفت طراحی طبقه ۵/۱ 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 میلی‌متر خواهد شد.

۲- ۲- غلاف (مکانیزم مقید در برابر کمانش)

غلاف در واقع به منظور جلوگیری از کمانش کلی و محدود نمودن کمانش موضعی هسته استفاده می‌شود. این اعضا برای نیروهای اعمالی از طرف هسته در نقاط تماس با یکدیگر طراحی می‌شوند. جنس مصالح استفاده شده برای غلاف مشابه مصالح هسته و ابعاد آن برابر ۱۰×۱۸۰ میلی‌متر مربع که توسط یک مقطع باکس شکل با ابعاد ۵×۶۰×۶۰ میلی‌متر مکعب مقاوم سازی شده است. جنس باکس از فولاد (DIN17135) A- ST52 با مقاومت تسلیم ۳۳۵ و مقاومت نهایی ۵۱۰ مگاپاسکال که به وسیله جوش به طور کامل به غلاف متصل شده است. در BRBs متداول به منظور جلوگیری از کمانش کلی الاستیک می‌بایست ضوابط واتانایب [۶] کنترل گردد. به منظور اتصال غلاف‌ها به یکدیگر از ورق‌هایی به ابعاد ۱۴×۵۰ میلی‌متر مربع که فیلر نامیده می‌شوند استفاده شده است. اتصال غلاف‌ها توسط پیچ بوده و فاصله آن‌ها به صورتی است که باید نزدیک به طول موج کمانشی بزگ‌تر باشد تا بتواند در برابر کمانش‌های موضعی مقاومت کند. دانیلو و همکاران [۱۶] روشی را به منظور محاسبه تعداد و طول موج کمانشی بر اساس معادل سازی بار کمانشی مود بزرگ‌تر هسته به مقاومت محوری هسته، پیشنهاد دادند. به منظور جلوگیری از اصطکاک بیش از حد میان هسته و غلاف، که ممکن است ناشی از انبساط هسته تحت اثر پواسون باشد ، فیلرها به گونه ای طراحی شدهاند که یک فاصله یک میلیمتری در راستای ضخامت و فاصله ۳ میلیمتری در راستای عرض برقرار شود. جهت تسهیل حرکت هسته بدون برخورد سخت کننده‌های انتهایی روی آن با مقطع باکس، شکاف‌هایی طولی (Longitudinal gap) بر روی باکس ایجاد شده است. طول شکاف، حداقل برابر نصف تغییر مکان حداکثر فشاری و حتی بزرگ‌تر از آن است، تا از تحمل بار توسط غلاف جلوگیری گردد. به منظور محدود نمودن هرگونه اصطکاک بین هسته و غلاف که احتمال وقوع پدیده خرابی خستگی کمسیکلی را افزایش می دهد از مصالحی همچون سرامیک، پلی اتیلین و گریس استفاده شده است.

روش‌های مختلفی برای جلوگیری از حرکت غلاف بر روی هسته در پژوهش های مختلف پیشنهاد شده است. یکی از این روش‌ها استفاده از اثر اصطکاک می‌باشد اما به دلیل غیر قابل پیش بینی بودن و کم بودن مقدار عددی آن و همچنین عملکرد نامطلوب آن در کارهای گذشته پیشنهاد نمی شود [۱۷-۱۹]. در این پژوهش به منظور حفظ غلاف بر روی هسته جزئیات جدیدی پیشنهاد می شود همانطور که در شکل (۳) مشاهده می گردد. بدین منظور از دو ورق مسی با ابعاد ۲×۱۰۰×۸۰ میلی‌متر مربع که مدول الاستیسیته آن نصف مدول الاستیسیته فولاد است استفاده شده است. جزئیات مهاربند طول کوتاه پیشنهادی مورد بررسی توسط رضوی و همکاران در شکل (۴) ارائه گردیده است.

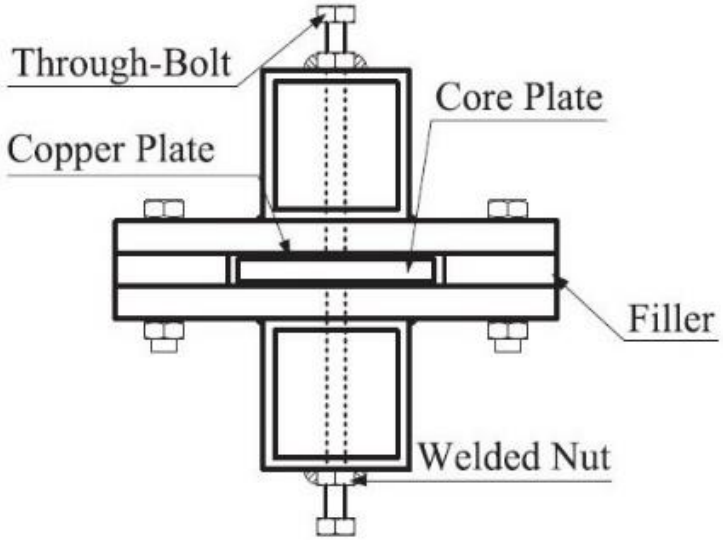
۲- ۳- پروتکل بارگذاری

پروتکل بارگذاری بر اساس استانداردASCE 341-10 است. بارها باید به منظور ایجاد تغییر شکل‌های زیر به سازه اعمال گردند. که در آن تغییر شکل مذکور در آزمایش نمونه محوری به عنوان تغییر شکل محوری هسته فولادی می‌باشد.

برای محاسبه سختی محوری اعضا با سطح مقطع متغیر از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$K = \frac{E}{\int_0^l \frac{dx}{A(x)}} \qquad (۱)$$

که در آن A(X) سطح مقطع ناحیه هسته با مقطع متغیر و E مدول الاستیسیته است.



شکل ۳. جزئیات اتصال هسته به غلاف مهاربند RLBRB[۹]

Fig. 3. Details of core connection to RLBRB Encasing

در این پژوهش K=119 کیلو نیوتن بر میلی‌متر حاصل شد که در نتیجه آن مقدار Δby برابر است با :

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

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

و برای محاسبه Δ_{bm} از رابطه (۲) استفاده شده است.

$$\Delta_{bm} = \frac{b}{2l} \times \Delta_m \qquad (۲)$$

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

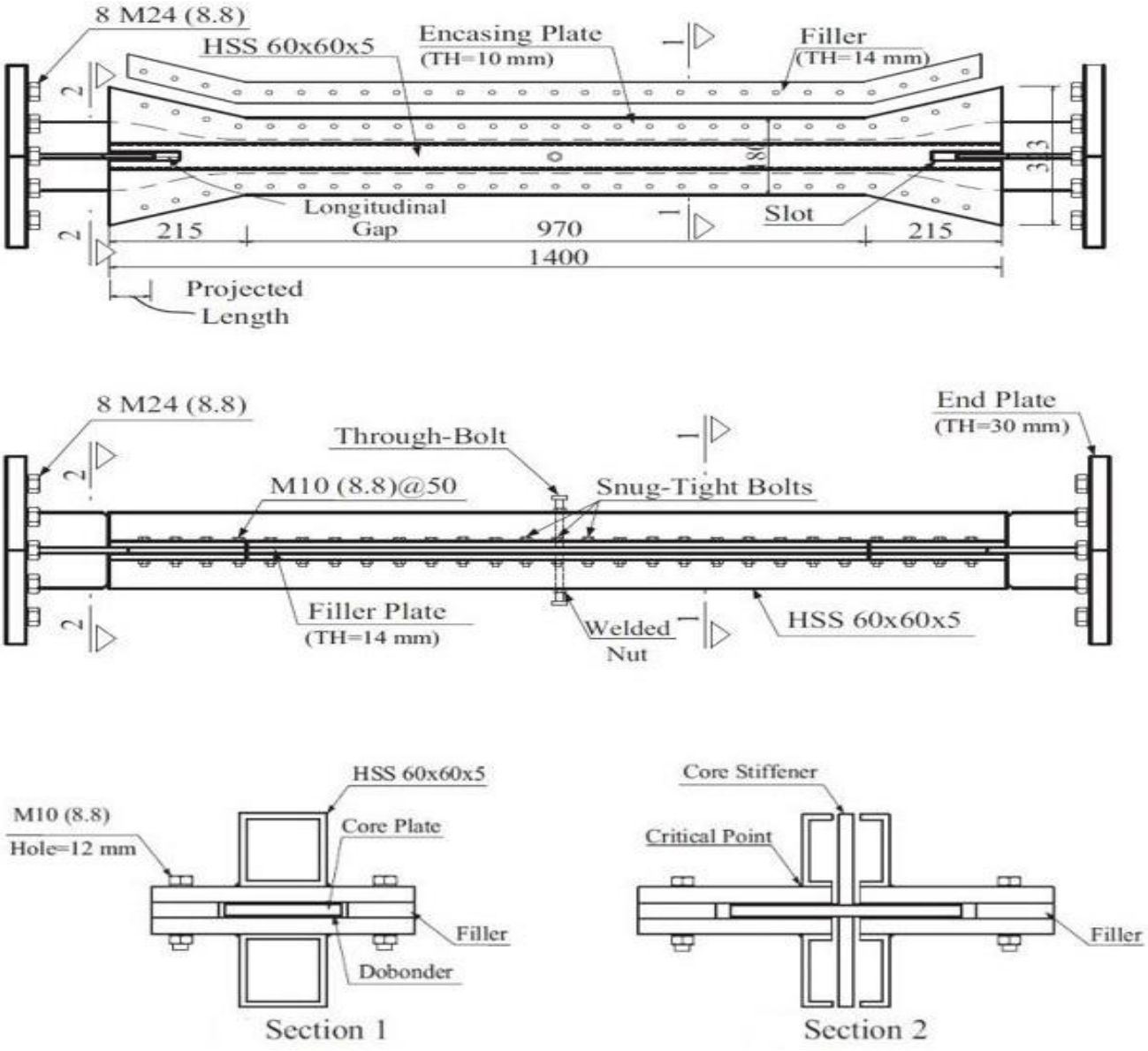
مقدار دریفت طراحی طبقه به طور محافظه کارانه ۵/۱ ٪ انتخاب گردیده است.در نتیجه مقدار Δ_{bm} برابر ۸/۲۸ میلی‌متر خواهد شد.

۲- ۴- نحوه مدل‌سازی خستگی کم سیکلی

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 میافتد. چنین پدیده‌ای را پدیده خستگی Fatigue گویند و شکست در اثر آن را Fatigue Failure و طراحی قطعات برای مقابله با پدیده خستگی را Fatigue Design گویند. خستگی در اثر اعمال تنش‌های متغیر با زمان (تنش‌های دینامیکی) به وجود می‌آید. 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 کرنش‌های 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 داد.

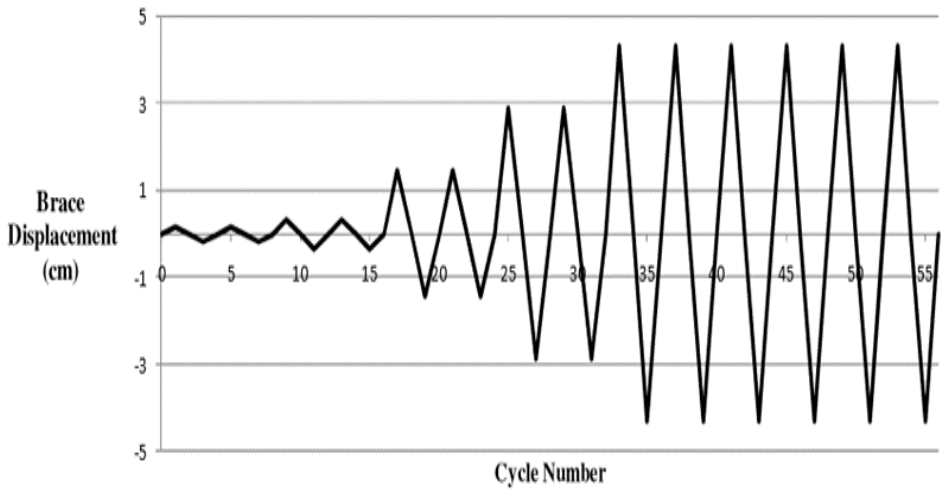
$$\varepsilon_c = \frac{\Delta_{\max}}{\alpha L} \times \cos\theta \qquad (۳)$$

که درآن ε_c 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 می‌باشد. مطالعات بر روی اثر خستگی کم سیکلی BRBs نشان می دهد 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 [۱۶ و ۱۵ و ۸].



شکل ۴. جزئیات مهاربند پیشنهادی رضوی وهمکاران [۹]

Fig. 4. Details of the proposed bracing by Razavi et al.



شکل ۵. پروتکل بارگذاری براساس استاندارد AISC [۲۹]

Fig. 5. Loading protocol based on AISC standard

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 [۱۷-۲۰]. به منظور ارزیابی عمر خستگی می‌توان از رابطه کافین مانسون، رابطه (۴) استفاده نمود.

$$\frac{\Delta_\varepsilon}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \qquad (۴)$$

بر اساس مطالعاتی که توسط رضوی و همکاران [۲۱] صورت گرفته است رابطه ناکامورا و همکارانش [۲۲] (رابطه (۵))، در بین روابط موجود به منظور محاسبه خستگی BRBs برای کرنش های زیر ۷ ٪ بسیار محافظه کارانه است.

$$\Delta_\varepsilon = 0.2048\, N_f^{-0.490} \qquad (۵)$$

باید توجه نمود به علت متغیر بودن دامنه کرنشی اعمالی به BRBs بایستی شاخص خرابی خستگی تجمعی (FDI) را که بر اساس رابطه ماینر ارزیابی می‌گردد معرفی نمود، رابطه (۶).

$$\mathrm{FDI} = \sum \frac{n_i}{N_{f_i}} \qquad (۶)$$

خرابی زمانی رخ می‌دهد که FDI = ۱ شود، بر این اساس طول هسته به طریقی تقریب زده می‌شود که FDI کمتر از یک باشد.

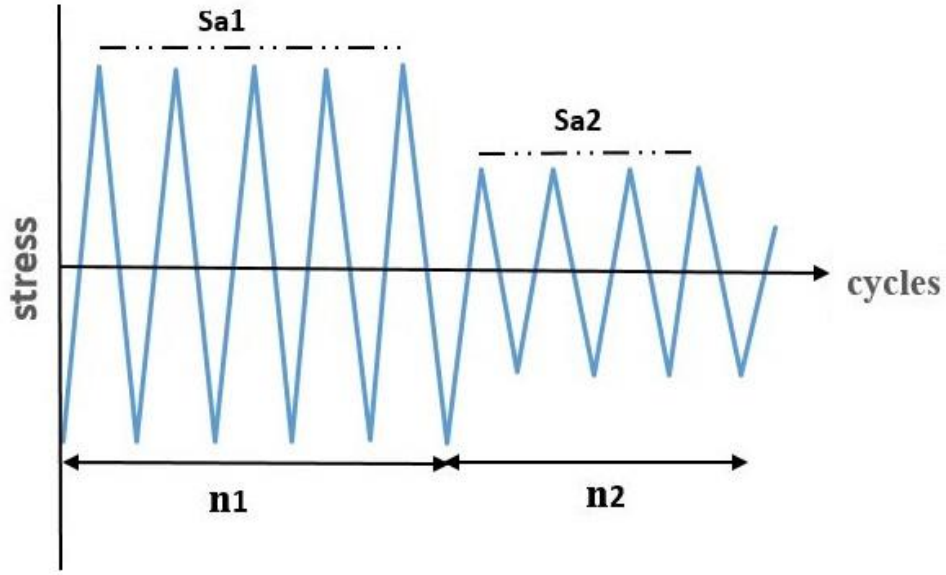
برای درک بهتر رابطه (۶) شکل ۶ ارائه گردیده است.

۳- صحت سنجی مدل تحلیلی در نرم افزار آباکوس

۳- ۱- مدل‌سازی تحلیلی مهاربند طول کوتاه رضوی

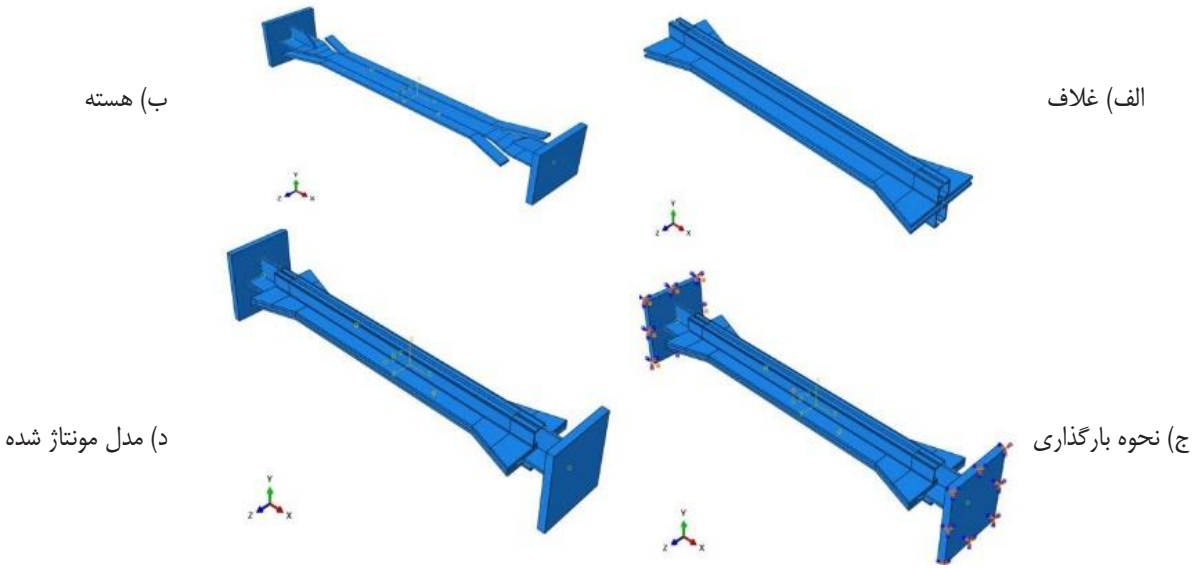
منحنی بار- تغییر مکان، نحوه کمانش هسته ، توزیع تنش در هسته و مقایسه با مدل آزمایشگاهی در شکل‌های ۷ تا ۱۰ نشان داده شده است. نمودار هیسترزیس به دست آمده در شکل ۹ قبل وقوع پدیده گسیختگی مهاربند می باشد.

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود هسته مهاربند طول کوتاه دچار کمانشهای موضعی گردیده است. در واقع این کمانشهای سینوسی شکل در پی افزایش تقاضای محوری مهاربند شکل میگیرد. بایستی توجه داشت که تغییر مکان‌های فشاری بزرگ‌تر سبب میشود که بخش هسته خیلی زود دچار تسلیم شود و در مودهای کمانشی بزرگ متحمل کمانش خارج صفحه شود. حداکثر نیروی کششی و فشاری مهاربند متناظر با دامنه کرنش آخر به ترتیب برابر ۵/۳۸۳ و ۲/۳۹۷ کیلو نیوتن میباشد. حداکثر



شکل ۶. مجموعه تنش‌ها با دامنه ثابت

Fig. 6. stress series with Fixed amplitude



شکل ۷. جزئیات مدل‌سازی مهاربند طول کوتاه (RLBRB)

Fig. 7. Details of reduced length buckling restrained brace modeling (RLBRB)

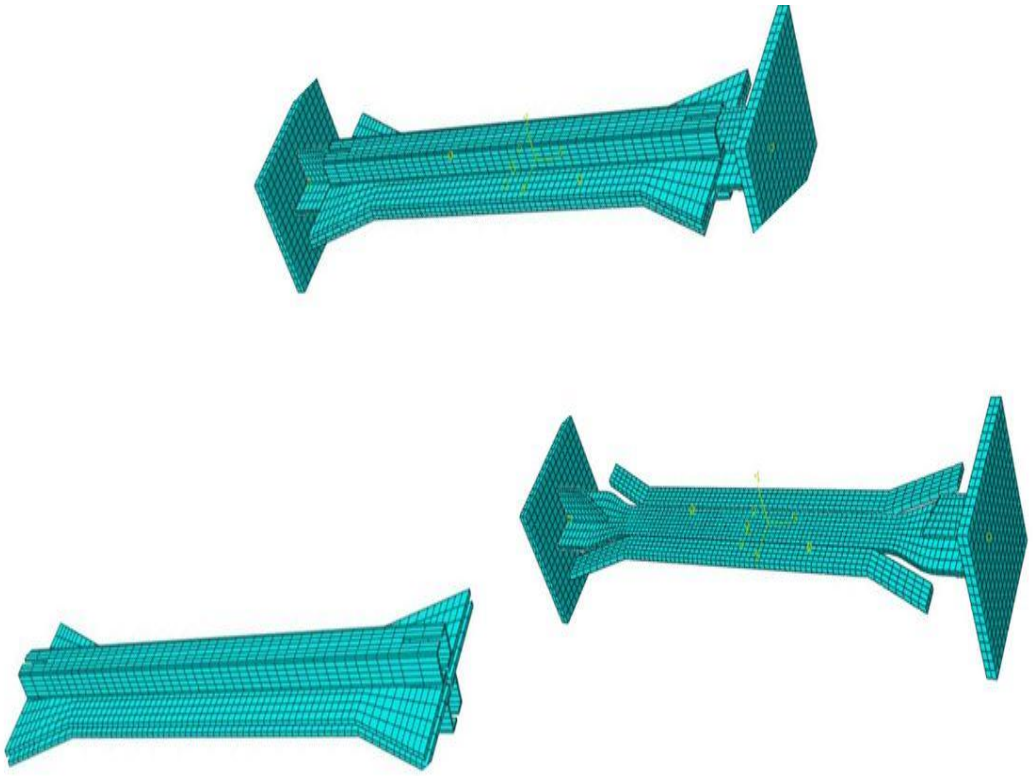
نیروی فشاری بزرگ‌تر از حداکثر نیروی کششی است.

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می گردد نمودار بار- تغییر مکان حاصل از تحلیل اجزا محدود بیانگر پایداری کامل مدل بوده و انطباق مناسبی نیز با مدل آزمایشگاهی دارد.

۴- معرفی مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل

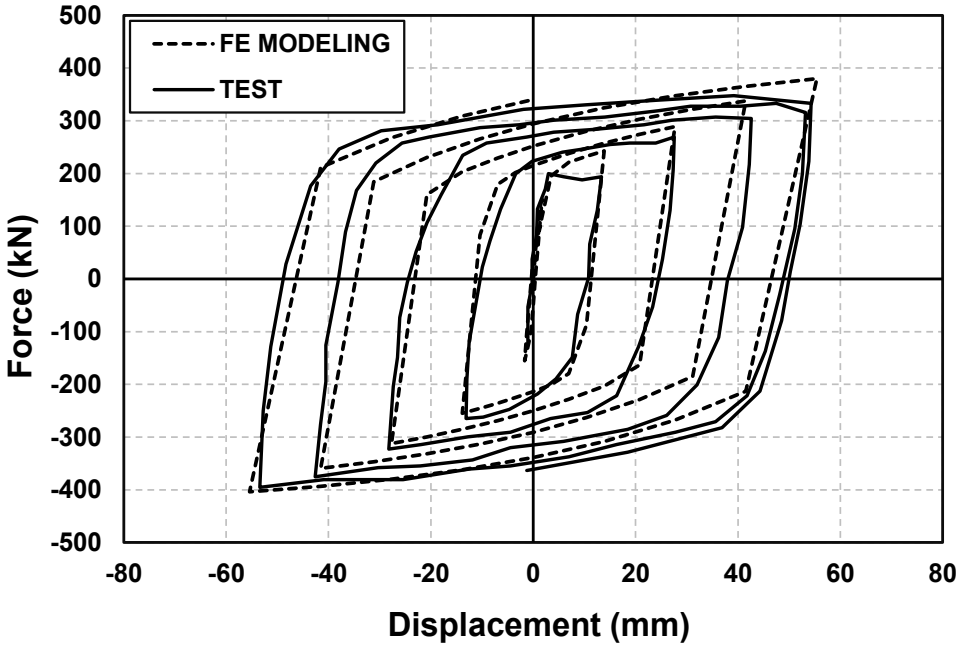
۴- ۱- جزئیات مدل‌سازی در نرم افزار آباکوس

مدل‌سازی اجزا محدود BRBs در نرم افزارAbaqus توسط محققان زیادی در سال‌های اخیر انجام شده است [۲۱ و ۲۰ و ۱۵]. به عنوان نمونه کروزکوا و همکاران تست لرزه ای یک BRB تمام فولادی که توسط



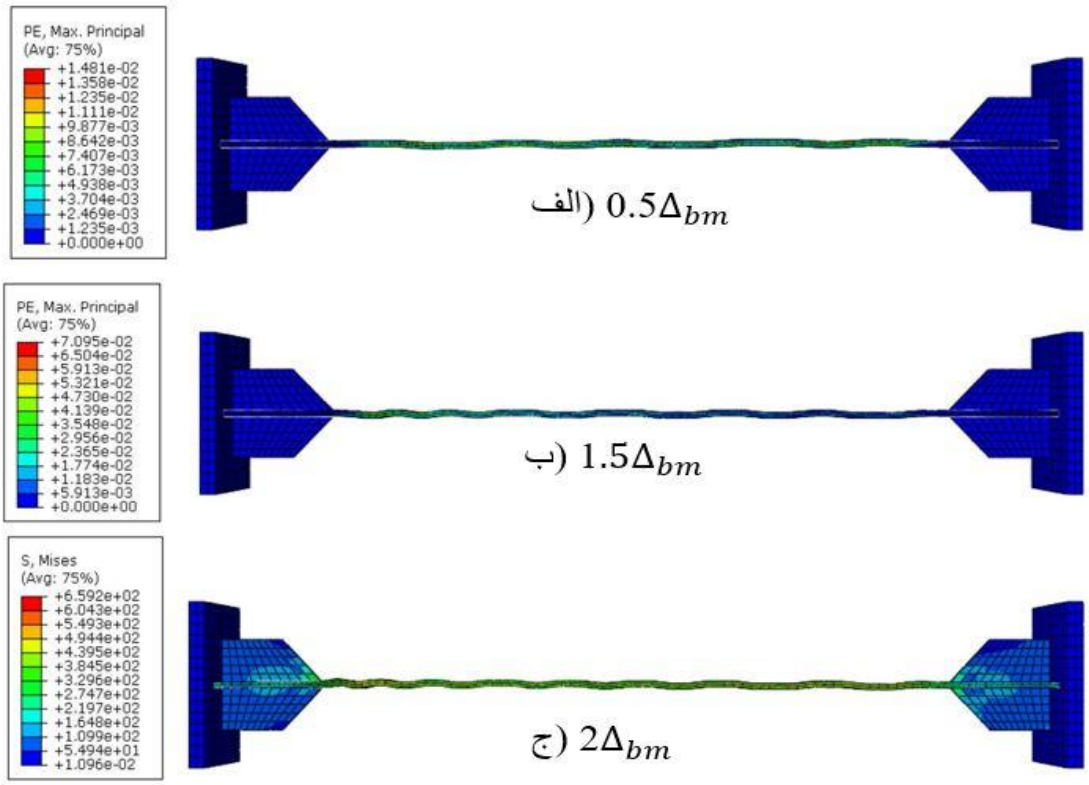
شکل ۸. مدل مش بندی شده مهاربند طول کوتاه (RLBRB)

Fig. 8. . Mesh Modeling of buckling restrained brace (RLBRB)



شکل ۹. صحت سنجی مدل آزمایشگاهی و مدل اجزا محدودی مهاربند طول کوتاه (RLBRB)

Fig. 9. Validation of Laboratory Model and Finite Element of buckling restrained brace (RLBRB)

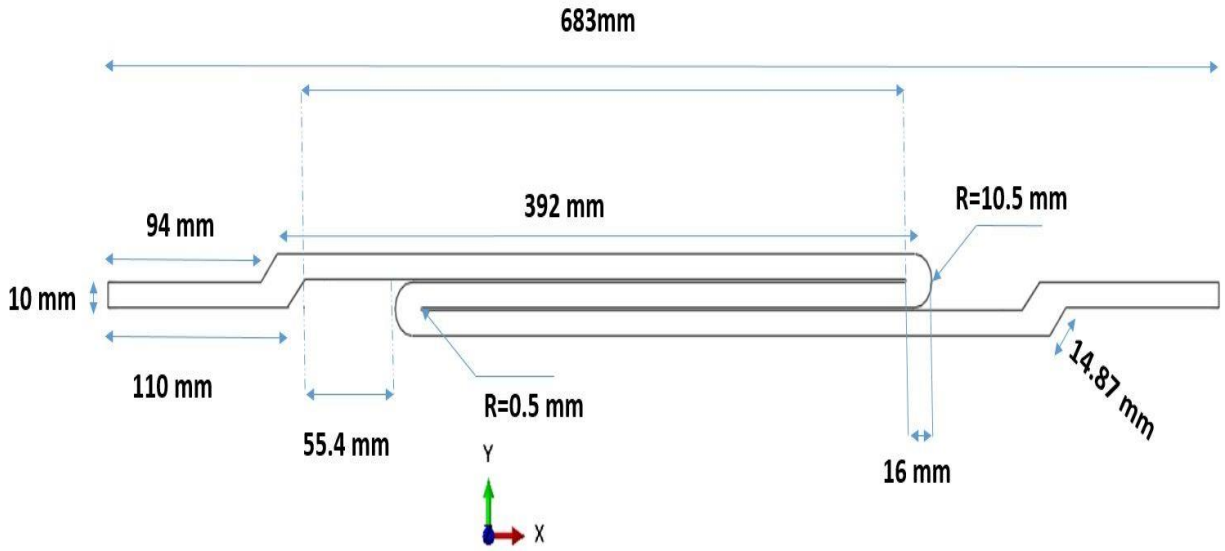


شکل ۱۰. نحوه توزیع تنش فون میزز مهاربند RLBRB در دامنه‌های کرنشی مختلف

Fig. 10. Distribution of von Mises Stress (RLBRB) in Different Strain Domains

ترامبلی و همکاران انجام شده بود را مدل‌سازی عددی نمودند [۲۱]. چو و چن [۲۰] نیز آنالیز اجزا محدودی بر روی دو نمونه BRB انجام دادند. رضوی و همکاران [۱۵] هم یک مطالعه همبستگی بر روی یک BRB تمام فولادی که توسط ارياشار و همکاران آزمایش شده بود را انجام دادند [۱۷]. در مطالعه حاضر مدل شامل ورق هسته، فیلر، غلاف، ورق‌های انتهایی و سخت‌کننده‌ها است. باید توجه نمود که چون هسته تحت تغییر شکل های پلاستیک بالا و مود کمانشی زیاد واقع می‌شود لازم است که برای مدل‌سازی آن از مدل C3D20 استفاده شود. این المان برای تغییر شکلهای بزرگ مناسب بوده و هر ۲۰ گره ۳ درجه آزادی دارند [۲۲] و برای سایر اعضا از المان C3D8 استفاده شده است. به منظور لحاظ خصوصیات تماسی هر دو رفتار نرمال، بدون هر گونه نفوذ و تماس بر روی چهار سطح هسته و سایر سطوح مرتبط در نظر گرفته شده است. گنا و همکاران [۲۸] ضریب اصطکاک را بر اساس نتایج آزمایشگاهی و عددی برای سطح تماس فولاد به فولاد که روغن کاری هم شده است ۰/ ۱۵ پیشنهاد نمودند. همچنین ارياشار و همکاران [۲۵] ضریب اصطکاک را برای سطح تماس بین فولاد و سطح پوشیده شده از گریس و پلی اتیلین ۰/ ۱ ارائه دادند. از آنجا که پژوهشهای 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 کرده‌ایم. مدول الاستیسیته و ضریب پواسون به ترتیب ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰/ ۳ است. از هر دو رفتار پلاستیک شامل سخت شدگی ایزوتروپیک و کینماتیک برای هسته استفاده شده است. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش کوپان بر روی ST 37-2، پارامترهای سخت شوندگی به شرح زیر بیان می‌گردد:

دو تا بک استرس با مقاومت تسلیم ۱۵۷ مگاپاسکال و مدول سخت شوندگی کینماتیکی C1 = ۴۶۰۰ و C2 = ۹۸۰۰۰ مگاپاسکال و فاکتور نسبت سخت شوندگی کینماتیکی Y1 =۲۵ و Y2 =۱۰۰۰ و همچنین مقدار حداکثر تغییرات در تنش تسلیم برابر Qb = ۱۱۰ مگاپاسکال و فاکتور نسبت b = ۴ برای مولفه های ایزوتروپیک لحاظ شده است. نقص اولیه‌ای به



شکل ۱۱. جزئیات هسته مهاربند S شکل

Fig. 11. Details of (RLBRB) with s-shaped core

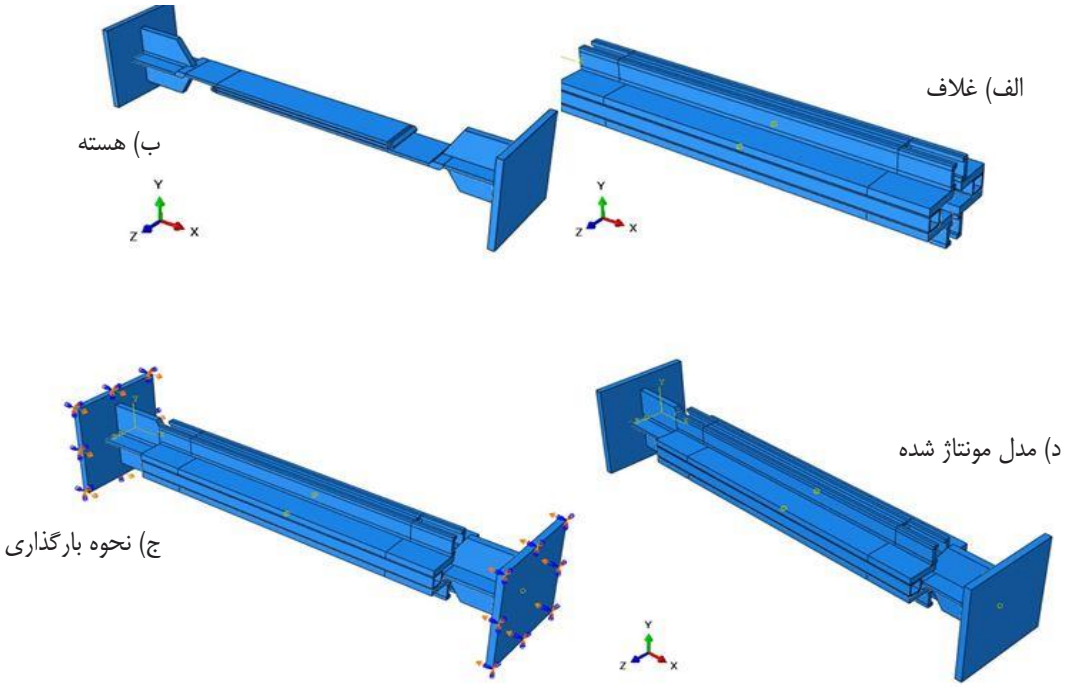
صورت یک فاصله بین غلاف و هسته، که برابر نصف ضخامت فاصله موجود بین هسته و غلاف است، برای تغییر شکل سینوسی هسته در وسط آن لحاظ شده است. از آنجایی که به منظور شکلدهی هسته به صورت دلخواه ممکن است تحت تاثیر تنشهایی واقع شود، لذا به منظور لحاظ شرایط واقعی عضو قبل بارگذاری این نقص اعمال شده است .

این پژوهش قصد دارد تا با ارائه مهاربند پیشنهادی که دارای طولی به نسبت کوتاهتر از مهاربندهای طول کوتاه متداول هستند، رفتار عملکردی در حد RLBRBs متداول را ارائه نماید. بایستی توجه داشت که در مهاربندهای طول کوتاه متداول هسته معمولا متشکل از یک سطح بوده که در برابر نیروی اعمالی مقاومت نموده و وارد بخش پلاستیک می‌گردد. اما در مدل پیشنهادی همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است هسته دارای سه سطح با همان مصالح و همان سطح مقطع به کار گرفته شده برای مهاربندهای قبلی (ST 37-2) است. هسته به ابعاد ۱۰×۸۰ میلی‌متر مربع و طول بخش تسلیم شونده ۴۶۳ میلی‌متر و طول کلی ۶۸۳ میلی‌متر است. برای هسته از المان‌های C3D20 و برای سایر اعضا از المان‌های C3D8 استفاده شده است. فاصله آزاد بین صفحات هسته ۱ میلی‌متر بوده و به منظور در نظر گرفتن اثر پواسون بر روی هسته که سبب انبساط آن می شود یک فاصله ۱ میلی‌متری در راستای ضخامت و یک فاصله ۲ میلی‌متری در راستای پهنای مهاربند در نظر گرفته شده است. جزئیات مدل پیشنهادی اعم از مونتاژ ، نحوه مش بندی و بارگذاری در شکل ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. پروتکل بارگذاری براساس استاندارد AISC 341-10 مانند بخش (۳-۲) اعمال می‌گردد.

۴- ۲- نتایج تحلیلی مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل

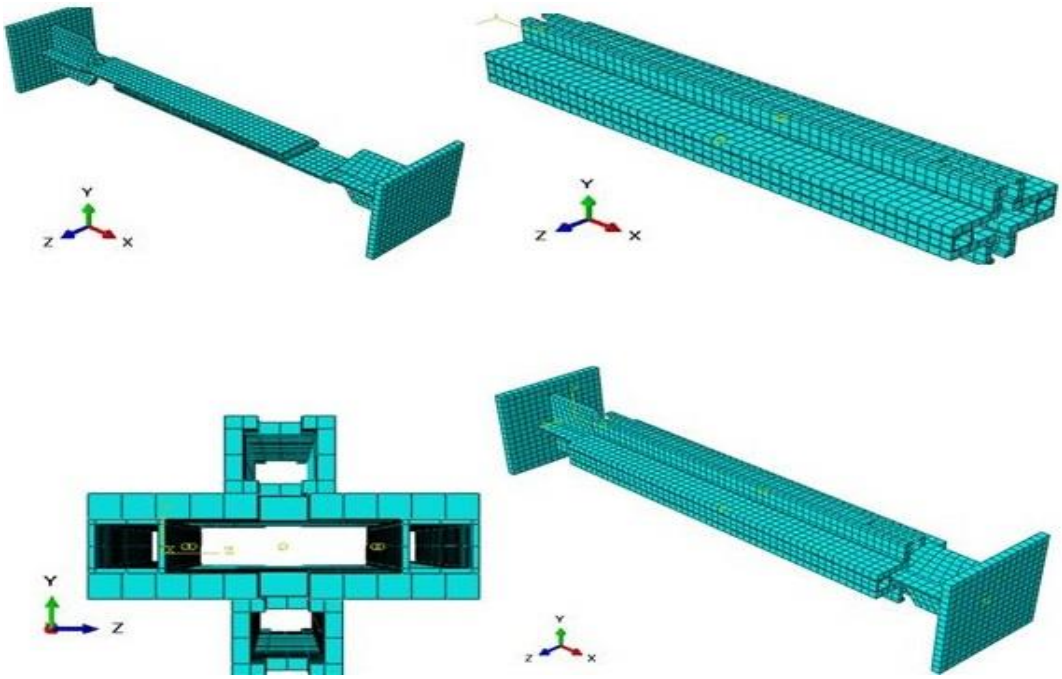
به منظور بررسی اثر خستگی کم سیکلی روابط ماینر و ناکامورا را مورد بررسی قرار میگیرد تا در ضمن بررسی وقوع یا عدم وقوع گسیختگی در مهاربند طول بهینه آن نیز حاصل شود. نتایج حاصل مربوط به رابطه ناکامورا تعداد چرخه‌های لازم تا خرابی خستگی کم سیکلی را ارائه می‌دهد (جدول ۱).

همانطور که ملاحظه می‌شود شاخص خرابی خستگی تجمعی زیر ۱ است و این موضوع بیانگر عدم گسیختگی مهاربند تا دامنه کرنشی Δbm ۵/۱ است با شروع دامنه کرنشی $\Delta bm2$ بعد از گذراندن ۲ سیکل اولیه پیشنهادی استاندارد AISC 341-10 مهاربند در آستانه گسیختگی قرار خواهد گرفت. نمودار هیسترزیس مهاربند پیشنهادی به خوبی بیانگر این



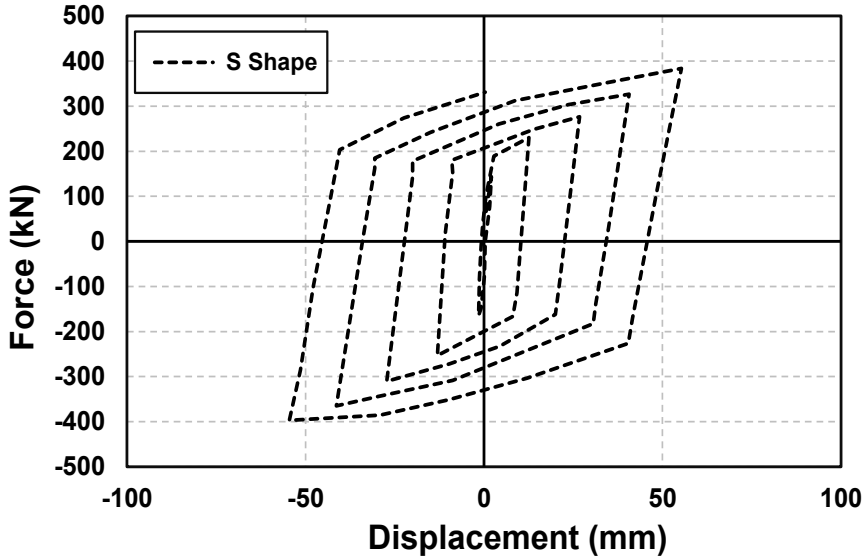
شکل ۱۲. جزئیات مدل‌سازی مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل

Fig. 12. Modeling details of reduced length buckling restrained brace(RLBRB) with s-shaped core



شکل ۱۳. نحوه مش بندی مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل

Fig. 13. How to meshing of reduced length buckling restrained brace(RLBRB) with s-shaped core



شکل ۱۴. نمودار چرخه ای مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل

Fig. 14. RLBRB hysteresis diagram with S-shaped core

جدول ۱. تعداد چرخه ها و شاخص خرابی برای مهاربند S

Table 1. Number of cycles and failure index for S-core(RLBRB)

دامنه های کرنشی	Δε	*Nf* (تعداد چرخه ها تا خرابی)	FDI (شاخص خرابی)
Δby	0.00464	2274	0.938<1
0.5Δbm	0.038	31	
Δbm	0.0755	7	
1.5Δbm	0.113	35	
2Δbm	0.151	2	

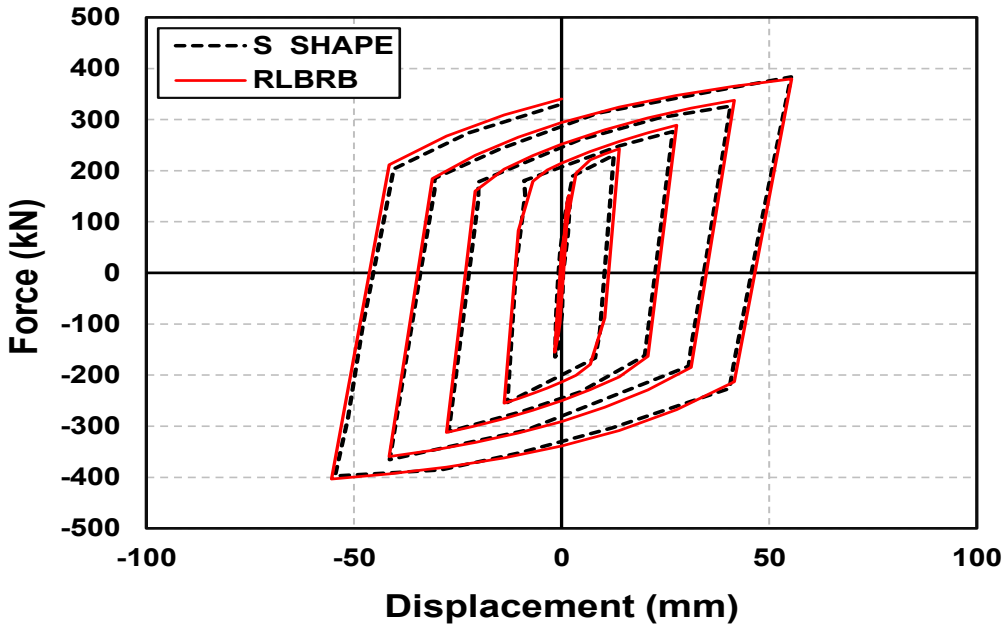
نتیجه خواهد بود (شکل ۱۴).

نمودار هیسترزیس مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل بیانگر رفتار چرخه‌ای پایدار و متقارن آن است. به منظور بررسی و مقایسه عملکرد مهاربند پیشنهادی با مهاربند طول کوتاه رضوی نمودار هیسترزیس آن‌ها در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

نکته مهم دیگری که در این مهاربندها اهمیت دارد کمانش مهاربند تحت چرخه‌های فشاری است. در این مطالعه به منظور به حداقل رساندن کمانشهای موضعی هسته، از فاصله آزاد بین هسته و غلاف تا آنجا که نتایج منطقی ارائه می‌شود کاسته شده است. همانطور که در شکل ۱۶ هم دیده می‌شود توزیع تنش‌ها در هسته یکنواخت بوده که این خود باعث ایجاد تعادل بین چرخه‌های فشاری و کششی و در نهایت پایداری کلی سازه می‌شود.

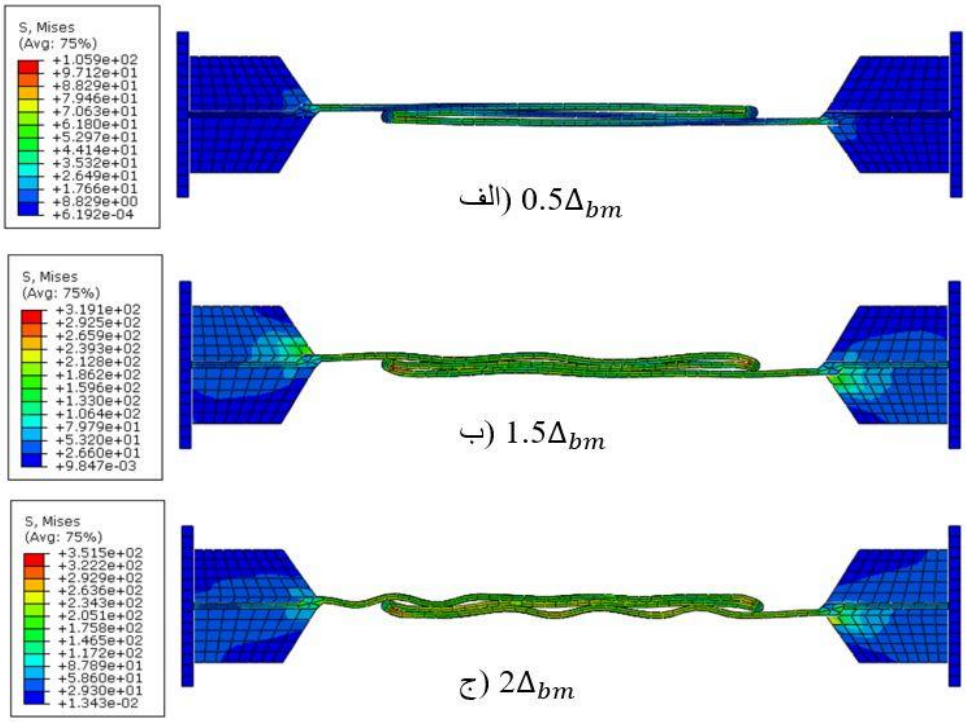
۵- مقایسه عملکرد لرزه ای مهاربند پیشنهادی با مهاربندهای کمانشتاب موجود

آنچه که در بحث مهاربندهای کمانشتاب بیشترین توجه را به خود جلب میکند میزان استهلاک انرژی این سازه‌ها است. چرا که با کاهش طول مهاربند میزان استهلاک انرژی در ناحیه خاصی از مهاربند متمرکز خواهد شد. اگر چه به منظور محاسبه استهلاک انرژی پارامترهایی از جمله سخت شوندگی ایزوتروپیک، اصطکاک بین هسته و غلاف، توزیع غیر یکنواخت کرنش در امتداد هسته در نظر گرفته می‌شوند اما باید دانست که قضاوت در مورد نقطه تمرکز استهلاک انرژی کار بسیار دشواری خواهد بود. یک کار آزمایشگاهی نشان داد که با کاهش طول هسته میزان استهلاک انرژی افزایش خواهد یافت [۱۲]. در شکل ۱۷ مقایسه بین میزان استهلاک انرژی



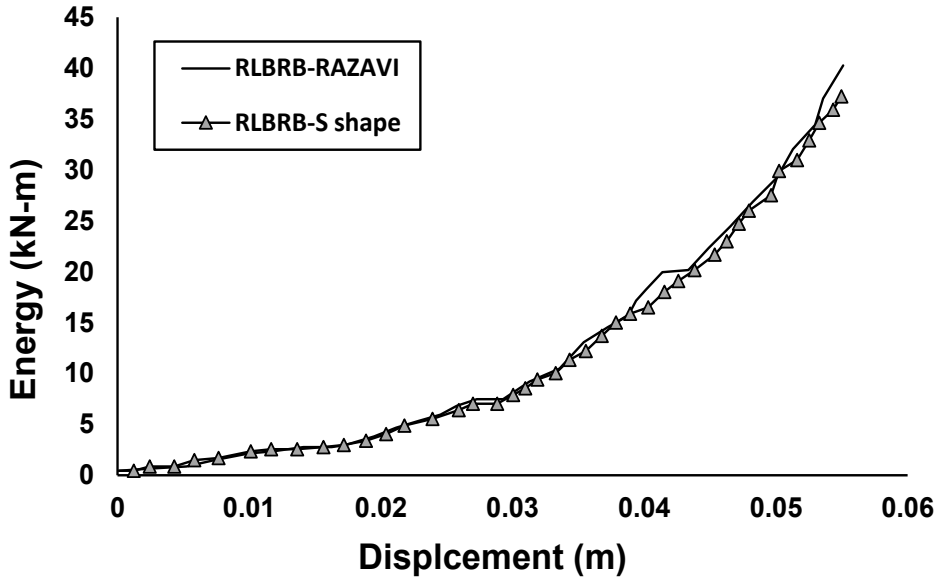
شکل ۱۵. مقایسه نمودار هیسترزیس مهاربند RLBRB و مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل

Fig. 15. Comparison of (RLBRB) hysteresis chart and S-core (RLBRB)



شکل ۱۶. کمانش موضعی مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل در دامنه‌های کرنشی مختلف

Fig. 16. Local buckling of (RLBRB) with s-shaped core at different strain amplitudes



شکل ۱۷. مقایسه استهلاک انرژی تجمعی مهاربند RLBRB و مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل

Fig. 17. Comparison of RLBRB cumulative energy damping and S-core (RLBRB)

مهاربند پیشنهادی با مهاربندهای طول کوتاه متداول انجام گرفته است.

۵- ۱- ارزیابی اثر ضخامت هسته بر روی میزان استهلاک انرژی مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل

شکل ۱۸ تأثیر تغییر ضخامت هسته در نمودار هیسترزیس را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که افزایش ضخامت هسته باعث ایجاد نیروهای واکنش بالاتر می‌شود. این با مقایسه شیب قسمت الاستیک مشخص است. افزایش ضخامت هسته باعث افزایش سطح مقطع هسته می‌شود که منجر به افزایش سختی BRB می‌شود. در نتیجه ، BRB سخت‌تر با ضخامت بزرگ‌تر دارای مقاومت بزرگ‌تری بوده که خود سبب تحمل نیروی بیشتری می‌شود.

با توجه به شکل می‌توان نشان داد که افزایش ضخامت هسته باعث افزایش انرژی هیسترزیس مهاربند می‌شود.

۵- ۲- ارزیابی اثرتنش تسلیم بر روی نمودار هیسترزیس

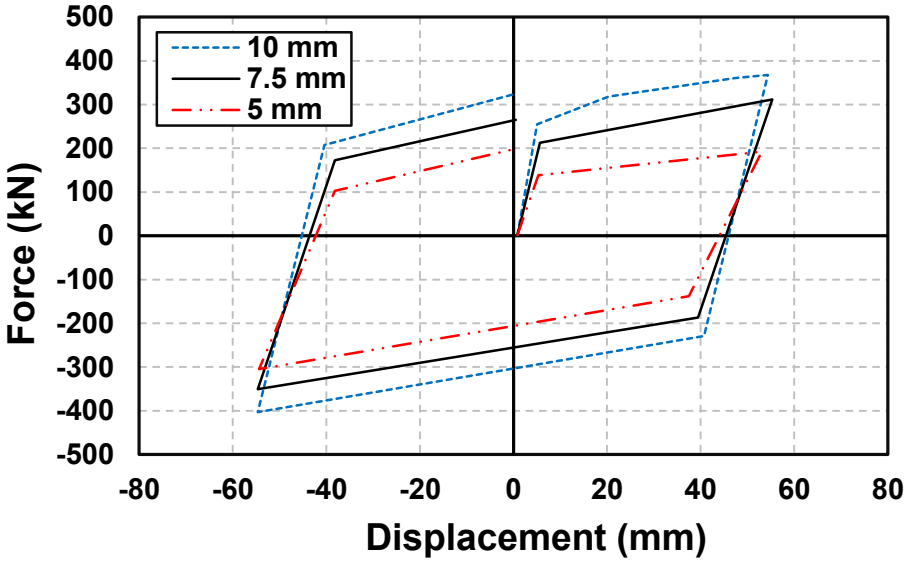
شکل ۱۹ تأثیر تغییر تنش تسلیم هسته در نمودار هیسترزیس بار- تغییر شکل را نشان می‌دهد. باید توجه نمود که افزایش تنش عملکرد (Fy) باعث ایجاد نیروهای واکنش بالاتر می‌شود. این را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که با افزایش تنش عملکرد ، بار عملکرد افزایش می‌یابد که از طریق معادله (۷) توجیه می شود.

$$P_y = F_y \times A \qquad (۷)$$

۵- ۳- ارزیابی معیار های پذیرش مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل

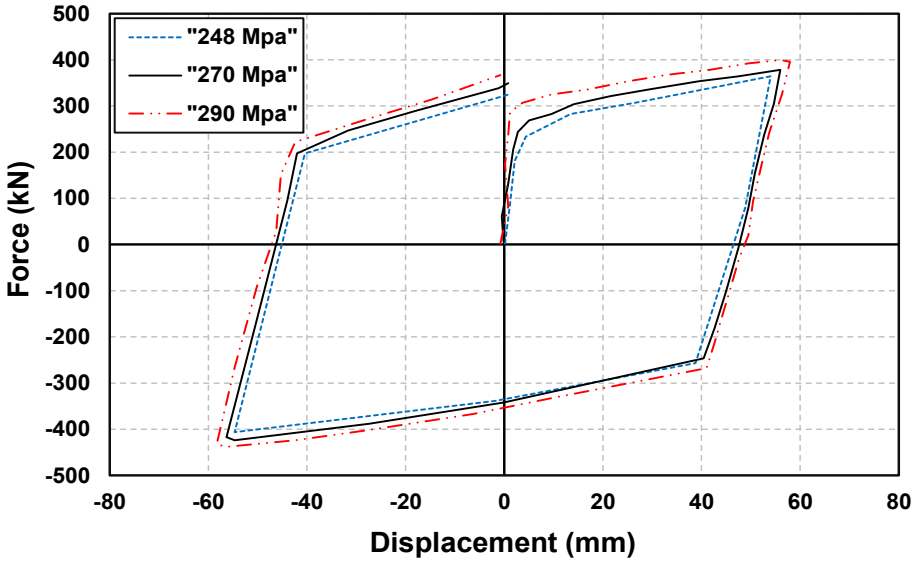
- منحنی بار-تاریخچه‌ی جابجایی باید نشانگر رفتار پایدار و قابل تکرار به همراه سختی مثبت افزاینده باشد.
- هیچ نوع شکست، ناپایداری مهاربند یا خرابی اتصال انتهایی مهاربند نباید مشاهده شود.
- در چرخه‌های با تغییر شکل بزرگ‌تر از Δby ، نسبت نیروی فشاری حداکثر به نیروی کششی حداکثر نباید بزرگ‌تر از ۳/۱ باشد.
- در چرخه‌های با تغییر شکل بزرگ‌تر از Δby، حداکثر نیروی کششی و فشاری نباید کمتر از مقاومت اسمی هسته باشد.

همانطور که در بخش‌های پیش ملاحظه شد نمودار هیسترزیس مهاربند پیشنهادی رفتاری پایدار در کشش و فشار از خود نشان داد. که این نشان



شکل ۱۸. اثر ضخامت هسته بر نمودار هیسترزیس مهاربند طول کوتاه s شکل

Fig. 18. The effect of core thickness on (RLBRB) s-shaped hysteresis



شکل ۱۹. تاثیرات تنش تسلیم بر روی نمودار هیسترزیس مهاربند طول کوتاه s شکل

Fig. 19. Effects of yield stress on(RLBRB) s-shaped hysteresis diagram

جدول ۲. نسبت نیروی فشاری حداکثر به نیروی کششی حداکثر

Table 2. The ratio of maximum compressive force to maximum tensile strength

دامنه کرنشی	$P_{max(KN)}$	$T_{max(KN)}$	نسبت(P_{max}/t_{max})
0.5Δbm	424.7	230.5	1.1
Δbm	310.5	276.2	1.12
1.5Δbm	365.2	326.4	1.12
2Δbm	397.2	383.5	1.03

جدول ۳. مقادیر ω و β برای مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل

Table 3. The values of ω and β for S-core (RLBRB)

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

دهنده عملکرد مطلوب مهاربند پیشنهادی می‌باشد.

و برای بررسی مورد آخر از آنجا که مقاومت اسمی هسته برابر ۳۶۵ مگاپاسکال است لذا همانطور که از جدول ۲ مشخص است فقط دامنه آخر اقناع نشده است. از آنجایی که درصد تفاوت دو مقدار در حد قابل قبول (زیر ۱۰ درصد) است در نتیجه مورد پذیرش است. از نتایج این گونه برداشت خواهد شد که مهاربند پیشنهادی به خوبی توانسته است معیارهای پذیرش را تا حد قابل قبولی اقناع نماید. 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. به منظور بررسی دقیق تر نتایج، ضرایب ω و β که به ترتیب ضریب اضافه مقاومت در فشار و ضریب سخت شوندگی کرنشی می‌باشند از رابطه ۸ و ۹ به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\beta = \frac{\beta\omega F_{ysc} A_{sc}}{\omega F_{ysc} A_{sc}} = \frac{P_{\max}}{T_{\max}} \qquad (۸)$$

$$\omega = \frac{\omega F_{ysc} A_{sc}}{F_{ysc} A_{sc}} = \frac{T_{\max}}{F_{ysc} A_{sc}} \qquad (۹)$$

در مطالعه ی حاضر ضرایب ω و β به صورت جدول ۳ و ۴ به ترتیب برای مهاربند پیشنهادی و همچنین برای مهاربند مورد بررسی رضوی ارائه شده است. ضرایب اصلاحی در طراحی ظرفیتی اعضای قاب BRBF مانند

جدول ۴. مقادیر ω و β برای مهاربند طول کوتاه RLBRB رضوی

Table 4. The values of ω and β for the (RLBRB) of Razavi

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 ۵. کنترل رابطه واتانایب برای غلاف مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل

Table 5. Watanibey relationship control for (RLBRB) with s-shaped core

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

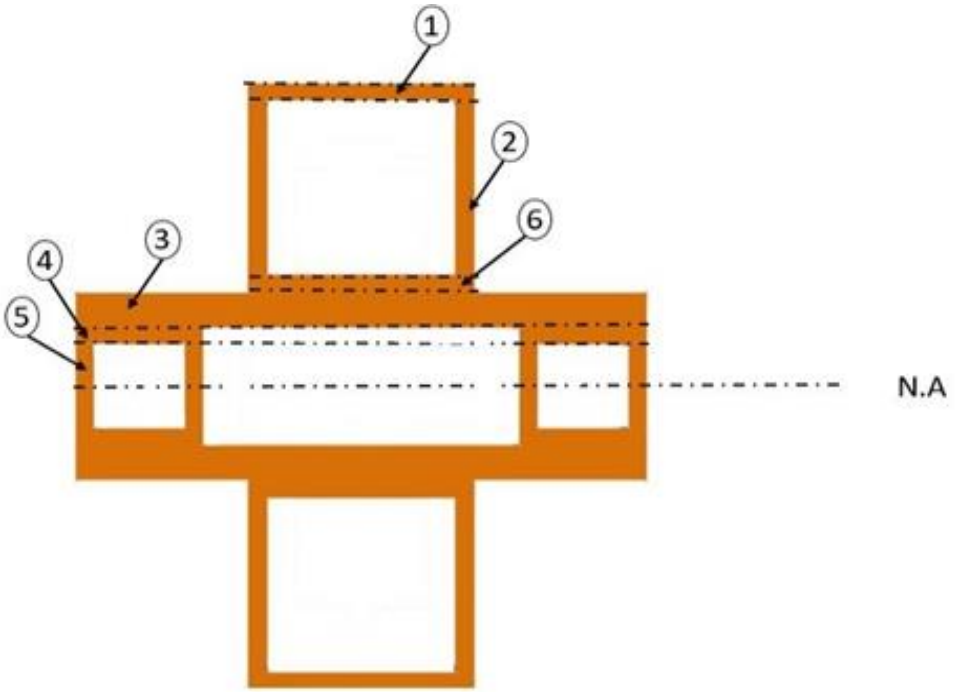
تیرها، ستون‌ها و اتصالات مورد استفاده قرار می‌گیرند تا این اعضا، الاستیک باقی مانده و رفتار غیرالاستیک سیستم محدود به مهاربندهای BRB شود. این دو پارامتر معمولا در بازه های زیر قرار دارند:

$$1.05 \le \omega \le 1.15$$
$$1.3 \le \omega \le 1.5$$

ضریب β با افزایش اثر پواسن در هسته و همچنین افزایش نیروی اصطکاک بین هسته و غلاف، افزایش می‌یابد. مقدار این ضریب در مطالعه ی حاضر کمتر از مقدار حداکثر مجاز (۱،۳) در آیین نامهی AISC است. این پدیده نشان می دهد اگر چه مقدار ماکزیمم کرنش در هسته نسبتا بالا است و اثر پواسن قابل توجه می‌باشد، ولی با استفاده از مصالح جداکننده و کاهش نیروی اصطکاک مقدار ضریب β همچنان در محدوده ی مجاز باقی می‌ماند. ضریب ω به مشخصات مصالح فولادی، تاریخچه‌ی بارگذاری و جزئیات BRB بستگی دارد. در این تحقیق به دلیل طول کوتاه قسمت تسلیم شونده، کرنش در آن افزایش می‌یابد. 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 به‌دست آورده اند[۲۷-۲۵].

۶- کنترل رابطه واتانایب برای غلاف

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



شکل ۲۰. مقطع غلاف مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل و ناحیه بندی آن به منظور محاسبه ممان اینرسی آن

Fig. 20. (RLBRB) cross-section encasing with s-shaped core and segmentation to calculate its inertia moment

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1 \qquad (۱۰)$$

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

$$P_e = \frac{\pi^2 E I_{sc}}{L_{sc}} \qquad (۱۱)$$

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

اثر سخت شوندگی کرنش چرخه‌ای در رابطه مذکور اعمال نشده است. با فرض اینکه سخت شوندگی کرنش چرخه‌ای باعث افزایش ۳۰٪ مقاومت فشاری مهاربند شود و یک ضریب Φ برابر ۸۵ /۰ در صورت کسر اضافه شود آنگاه رابطه به صورت زیر اصلاح می‌گردد:

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1.53 \qquad (۱۲)$$

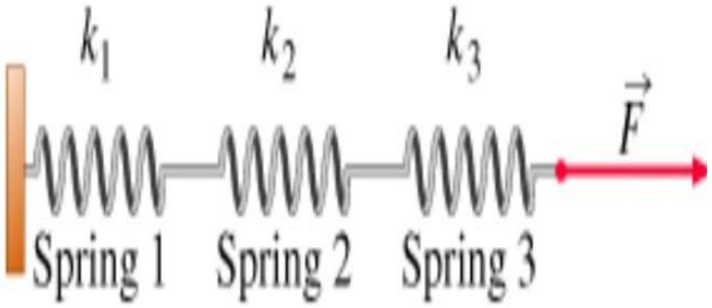
مقطع غلاف مورد استفاده برای مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل در شکل ۲۰ نشان داده شده است و نتایج به صورت جدول ۵ ارائه می‌شود.

۷- نحوه مدل‌سازی مهاربند s شکل

در مهاربند پیشنهادی سه ردیف ورقه فولادی را می‌توان با سه فنر سری معادل نمود همانطور که در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

مهاربند مورد مطالعه رضوی به صورت یک ورق صاف است که سختی آن از رابطه (K= EA/L) حاصل می‌شود حال با در نظر گرفتن شرایط مهاربند طول کوتاه با هسته s شکل (L'=L/3) میزان سختی آن برابر است با:

$$\frac{1}{k_{eq}} = \sum \frac{1}{k_i} \rightarrow \frac{1}{k_{eq}} = \frac{3 * \frac{l}{3}}{EA} \rightarrow k_{eq} = \frac{EA}{L} \qquad (۱۳)$$



شکل ۲۱. نمایش قرارگیری فنرها به صورت سری

Fig. 21. Show springs position in series

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

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

میزان کرنش پلاستیک در مهاربند رضوی براساس رابطه ($\varepsilon p=\Delta L/L$) حاصل می‌شود. لذا در ادامه مقدار کرنش پلاستیک در مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل را محاسبه می‌نماییم.

$$\varepsilon'_P = \frac{\Delta L'}{L'} = \frac{\frac{\Delta L}{3}}{\frac{L}{3}} = \frac{\Delta L}{L} \qquad (۱۴)$$

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

$$\Delta_1 = \frac{F}{K_1},\ \Delta_2 = \frac{F}{K_2},\ \Delta_3 = \frac{F}{K_3} \qquad (۱۵)$$

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 ($K_1 = K_2 = K_3$).

در نتیجه ملاحظه می‌شود که مقدار کرنش پلاستیک در مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل با مقدار متناظر آن در مهاربند پیشنهادی رضوی برابر است.

۹- نتیجه گیری

در این پژوهش نوع جدیدی از مهاربندهای کمانشتاب با طول کوتاه دارای هسته s شکل ارائه گردیده است. که هدف از این پژوهش مرتفع کردن برخی از مشکلات اجرایی و عملکردی موجود در مهاربندهای کمانشتاب با طول بلند و کوتاه متداول می‌باشد. مهاربند طول کوتاه با هسته S شکل با استفاده از نرم افزار اجزا محدود آباکوس مورد تحلیل های غیرخطی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل های غیر خطی اجزا محدودی نشان می‌دهد که:

مهاربند مورد نظر تا انتهای پروتکل بارگذاری استاندارد AISC 341 رفتار چرخه‌ای پایداری بدون افت مقاومت و سختی را از خود نشان داده و هیچ گونه کمانش کلی در آن رخ نداده است. به دلیل ایجاد فاصله بسیار کم بین هسته و غلاف ، کمانش موضعی محدود گردید که این امر خود موجب توزیع یکنواخت تنش در مهاربند می‌شود. همچنین بر اساس نتایج حاصل از تحلیل مشخص گردید استهلاک انرژی مهاربند پیشنهادی با هسته S شکل مشابه مهاربندهای طول کوتاه متداول است. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش مهاربندهای کمانشتاب طول کوتاه با هسته S شکل به دلیل داشتن وزن سبک و قابلیت حمل و نقل آسان به عنوان جایگزینی برای مهاربند های متداول پیشنهاد می‌گردد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را از همکاریهای صمیمانه مرکز محاسبات سریع دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود به منظور انجام آنالیزهای المان محدود غیر خطی اعلام می‌دارند.

۱۰- فهرست علائم

K	سختی محوری مهاربند $\left(\frac{N}{mm}\right)$
$A(x)$	سطح مقطع هسته (mm^2)
E	مدول الاستیسیته $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$
F	نیرو (N)
L	طول مهاربند (mm)
b	دهانه مهاربند (mm)
Δ_{max}	حداکثر دریفت طراحی طبقه (mm)
Δ_{bm}	تغییر شکل محوری مهاربند متناظر با دریفت طراحی طبقه (mm)
Δ_{by}	تغییر شکل محوری مهاربند در حد تسلیم مهاربند (mm)
Δ_m	دریفت طراحی طبقه (mm)
Δ_ε	دامنه کرنشی هسته
n_i	تعداد چرخه ها
N_{fi}	تعداد چرخه ها تا خرابی خستگی
θ	زاویه مهاربند نسبت به افق
c	مولفه شکلپذیری خستگی
ε_c	تقاضای کرنشی هسته
α	نسبت طول تسلیم شونده هسته به طول کل
P_{max}	حداکثر نیروی فشاری (N)
T_{max}	حداکثر نیروی کششی (N)
β	ضریب سخت شوندگی کرنشی
ω	ضریب اصلاح کشش-فشار
F_{ysc}	تنش تسلیم هسته $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$
A_{sc}	سطح مقطع تسلیم هسته (mm^2)
بالانویس*	**شرایط مرجع**
P_e	مقاومت کمانش الاستیک فولادی (kN)
P_y	مقاومت تسلیم عضو مقید تسلیم شونده (kN)
I_{sc}	ممان اینرسی غلاف فلزی (mm^4)
L_{sc}	طول غلاف فلزی (mm)
ε_p	کرنش پلاستیک مهاربند رضوی
ε_p'	کرنش پلاستیک مهاربندS شکل
K_{eq}	سختی معادل مهاربند ()
ΔL	تغییر طول مهاربند
L	طول اولیه مهاربند (mm)
Π	عدد پی معادل 3.14

منابع

[1] C. Black, I.D. Aiken, N. Makris, Component testing, stability analysis, and characterization of buckling-restrained unbonded braces (TM), Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2002.

[2] A. Parry Brown, D. Aiken Ian, F.J. Jafarzadeh, Buckling restrained braces provide the key to the seismic retrofit of the Wallace F. Bennett Federal Building, Modern Steel Construction, 8 (2001) 123-124.

[3] A. Wada, M. Nakashima, From infancy to maturity of buckling restrained braces research, in: 13th WCEE, 2004.

[4] Q. Xie, State of the art of buckling-restrained braces in Asia, Journal of constructional steel research, 61(6) (2005) 727-748.

[5] R. Tremblay, G. Degrange, J. Blouin, Seismic rehabilitation of a four-story building with a stiffened bracing system, in: Proceeding of the 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering, vancouver, 1999.

[6] 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.

[7] P. Clark, Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices, in: International Post-

Engineering Vibration, 8(3) (2009) 359-371.

[18] T. Usami, C. Wang, J. Funayama, Low-cycle fatigue tests of a type of buckling restrained braces, Procedia Engineering, 14 (2011) 956-964.

[19] 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.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 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).

[23] 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).

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

[25] 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.

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

[27] 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).

[28] F. Genna, P. Gelfi, Analysis of the lateral thrust in SMiRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Korea, 1999.

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

[9] 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.

[10] P. Dusicka, J. Tinker, Global restraint in ultra-lightweight buckling-restrained braces, Journal of Composites for Construction, 17(1) (2012) 139-150.

[11] R. Tremblay, L. Poncet, P. Bolduc, R. Neville, R. DeVall, Testing and design of buckling restrained braces for Canadian application, in: Proceedings of the 13th world conference on Earthquake Engineering, 2004.

[12] M. Mirtaheri, A. Gheidi, A.P. Zandi, P. Alanjari, H.R. Samani, Experimental optimization studies on steel core lengths in buckling restrained braces, Journal of constructional steel research, 67(8) (2011) 1244-1253.

[13] N. Hoveidae, B. Rafezy, Overall buckling behavior of all-steel buckling restrained braces, Journal of Constructional Steel Research, 79 (2012) 151-158.

[14] N. Hoveidae, Local buckling behavior of core plate in all-steel buckling restrained braces, International journal of steel structures, 15(2) (2015) 249-260.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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

bolted steel buckling-restrained braces. I: Experimental and numerical results, Journal of structural engineering, 138(10) (2011) 1231-1243.

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

[30] Li, Liang, et al. “A New Buckling-Restrained Brace with a Variable Cross-Section Core.” Advances in Civil Engineering 2019 (2019).

[31] Hoveidae, N., Tremblay, R., Rafezy, B., & Davaran, A. (2015). Numerical investigation of seismic behavior of short-core all-steel buckling restrained braces. Journal of Constructional Steel Research, 114, 89-99.

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

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Tahmasbi, J. Shafaei, An Analytical Study of Seismic Performance of a New Type of Reduced Length Buckling Restrained Brace (RLBRB) with S-shaped Core, Amirkabir J. Civil Eng., 53(6) (2021) 2451-2474.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17407.6554

This page intentionally left blank