

Experimental evaluation of an innovative buckling-restrained fuse for concentrically braced frames under cyclic loading

Masoud Mohammadi¹, Mohammad Ali Kafi^{2*}, Ali Kheyroddin³, Hamid Reza Ronagh⁴

1- Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- Professor, Dept. of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

4- Professor, Center for Infrastructure Engineering, Western Sydney University, Sydney, Australia

ABSTRACT

Concentrically braced frames (CBFs) have become prevalent as a lateral load resisting system due to their rigidity, low lateral displacement and ease of implementation over the last three decades. These advantages encourage the increasing utilization of this system in the construction industry. Despite the advantages of CBFs, the lack of ductility and buckling of the bracing element before yielding is the main disadvantage this lateral system. In the last three decades, studies have become focused on the ductility and energy dissipation of the CBFs that were modified in terms of using dampers and fuse segments. The current study aims to presents an innovative Composite Buckling Restrained Fuse (CBRF) to be used as a bracing segment. CBRF with relatively small dimensions is an improvement on Reduced Length Buckling Restrained Brace (RL-BRBs) as a hysteretic damper with different performance in tension and compression. Extra tensile elements in a novel configuration were used to compensate for the limitation of tensile strength that exists in bracing elements containing ordinary fuse segments. Here, some key design parameters of CBRF such as length and cross-sectional area of the core are discussed theoretically. Two specimens were designed and tested under cyclic loads. Moreover, the hysteretic response of the specimens was evaluated to calculate their strength adjustment parameters. The results indicate that the proposed CBRF has a ductile behavior with an average strain of 5% and high energy absorption capacity along with sufficient tensile strength.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 April 2019

Revise Date: 26 May 2019

Accept Date: 03 June 2019

Keywords:

Steel structure;
Braced frames;
Structural fuse;
Ductility;
Hysteretic damper;
Buckling-restrained braces.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.182841.1838

*Corresponding author: Mohammad Ali Kafi

Email address: mkafi@semnan.ac.ir

مطالعه آزمایشگاهی فیوز نوین کمانش‌ناپذیر کامپوزیتی برای مهاربندهای هم‌محور

تحت بار چرخه‌ای

مسعود محمدی^۱، محمدعلی کافی^{۲*}، علی خیرالدین^۳، حمیدرضا رونق^۴

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استاد، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۴- استاد، دانشگاه وسترن سیدنی، سیدنی، استرالیا

چکیده

مهاربندهای هم‌محور از متداول‌ترین عناصر قابل استفاده در تامین مقاومت جانبی سازه می‌باشند که به دلیل سختی زیاد، تغییر مکان جانبی کم، سهولت اجرا و مقرون به صرفه بودن همواره طراحان سازه‌های فولادی را به استفاده از این سیستم ترغیب نموده است. با این وجود از مهمترین معایب این نوع مهاربندها ضعف در شکل‌پذیری و کمانش اعضای مهاربند ضمن قرار گرفتن در معرض فشار، پیش از تسلیم شونده است. در سه دهه گذشته جهت رفع نقیصه‌های این سیستم پرکاربرد از تمهیداتی در اعضا مانند فیوزهای سازه‌ای استفاده شده است. این مقاله به ارائه یک فیوز نوین کمانش‌ناپذیر کامپوزیتی (CBRF) برای استفاده در اعضای مهاربند می‌پردازد. این فیوز با ابعادی به نسبت کوچک، تکامل یافته مهاربندهای کمانش‌ناپذیر طول کوتاه (RL-BRBs)، یک میراگر هیستریزیس با رفتار و ظرفیت باربری متفاوت در کشش و فشار است. استفاده از اجزای کششی مضاعف در این فیوز توانسته است تا کاهش ظرفیت کششی اعضای مهاربند ناشی از استفاده فیوزهای معمول سازه‌ای در آنها را مرتفع نماید. در این مطالعه تعدادی از پارامترهای مهم طراحی فیوز پیشنهادی مانند طول و ضخامت هسته مرکزی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه طی یک مطالعه آزمایشگاهی دو نمونه از این قطعه طراحی، ساخته و در آزمایشگاه تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته است. در انتها پارامترهای تنظیم کننده مقاومت ضمن بررسی نمودار هیستریزیس نمونه‌ها محاسبه و مقایسه شده است. نتایج حاکی از رفتار شکل‌پذیر فیوز پیشنهادی با کرنش متوسط ۵٪، توام با ظرفیت کششی و استهلاک انرژی مناسب می‌باشد.

کلمات کلیدی: مهاربندهای هم‌محور، فیوزهای سازه‌ای، شکل‌پذیری، استهلاک انرژی، مهاربندهای کمانش‌ناپذیر

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/JSCE.2019.182841.1838	10.22065/JSCE.2019.182841.1838	۱۴۰۰/۰۴/۳۰	۱۳۹۸/۰۳/۱۳	۱۳۹۸/۰۳/۱۳	۱۳۹۸/۰۳/۰۵	۱۳۹۸/۰۲/۰۳
			محمدعلی کافی		*نویسنده مسئول:	
			mkafi@semnan.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

از دیرباز عمده تلاش مهندسان و محققان سازه بر ارائه راهکارهای مناسب و دستورالعمل‌هایی برای کاهش صدمات جانی و مالی ناشی از بارهای جانبی وارد به ساختمان‌های علی‌الخصوص زلزله بوده است به گونه‌ای که امروزه کمتر سازه‌ای را می‌بینیم که هیچگونه تمهیداتی برای زلزله در آن تعبیه نشده باشد. اگر نگاهی گذرا به تاریخچه سیستم‌های سازه‌ای انداخته شود، در خواهیم یافت که قدمت استفاده از سیستم‌های قابی برای دستیابی بشر به ساختمان‌ها با ارتفاع بیشتر به حدود ۱۳۵ سال پیش با اجرای ساختمان ۱۰ طبقه خانه بیمه شیکاگو در سال ۱۸۸۳ میلادی باز می‌گردد [۱]. تا قبل از زلزله نورث‌ریچ در سال ۱۹۹۴ میلادی، سازه‌های دارای قاب خمشی، به عنوان سازه با سیستمی شکل‌پذیر و مقاوم در برابر زلزله نسبت به سایر سیستم‌های سازه‌ای متداول محسوب می‌شدند. با وقوع این زلزله صدمات فراوانی به قاب‌های خمشی فولادی دارای اتصالات جوشی تیر به ستون وارد گردید. هزینه‌ی قابل ملاحظه‌ی بازسازی و پراکندگی نقاط آسیب دیده در این سیستم باعث شد تا در دنیا تغییر نگرش‌هایی در آیین‌نامه سازه‌های فولادی ایجاد گردد [۲]. از آن پس توجه طراحان و پیمانکاران ساختمانی به استفاده از سیستم‌های سازه‌ای با عناصر مقاوم جانبی متمرکز جلب گردید. آسیب دیدگی در این نوع سیستم‌ها به قطعه خاصی منجر می‌شد و هزینه بازسازی به مراتب کاهش می‌یافت. سیستم قاب مهاربندی هم‌محور نمونه‌ای از این سیستم‌ها است که عضو مهاربند به عنوان قطعه فیوز نقش فداشوندگی را در آن ایفا می‌کند. این سیستم در کنار مزایایی همچون سختی جانبی زیاد، تغییر مکان جانبی کم، سهولت اجرا و مقرون به صرفه بودن از شکل‌پذیری کمی در مقایسه با سیستم قاب خمشی برخوردار است. به همین دلیل مطالعات بر روی افزایش شکل‌پذیری مهاربندهای هم‌محور به عنوان یک سیستم پرکاربرد متمرکز گردید. در سه دهه گذشته تحقیقات و پژوهش‌های گسترده‌ای به منظور افزایش شکل‌پذیری مهاربندهای هم‌محور صورت گرفته است. در عمده این تحقیقات سعی بر آن بوده تا با ارائه اصلاحاتی در اتصالات، تعبیه قطعه‌ای شکل‌پذیر در عضو مهاربند یا در نظر گرفتن تمهیداتی برای جلوگیری از کماتش زود هنگام عضو مهاربند، شکل‌پذیری آن را افزایش دهند. از این نمونه‌ها می‌توان به میراگر اصطکاکی پال با مکانیزم سطوح لغزشی اصطکاکی در سال ۱۹۸۲ میلادی [۳]، اتصال اصطکاکی پوپوف در سال ۱۹۹۳ میلادی [۴]، قطعات اصطکاکی لغزشی خطی و دورانی [۵] اشاره نمود.

میراگرهای تسلیمی یا قطعات جاری شونده نیز از دیگر روش‌های مستهلک کننده انرژی می‌باشند که جهت شکل‌پذیر کردن سیستم‌های مهاربندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نمونه‌های اولیه قطعات فولادی جاذب انرژی نخستین بار توسط کلی و اسکینر برای استفاده در ساختمان‌ها و پل‌ها در سال ۱۹۷۲ ارائه گردید [۶، ۷]. این قطعات با مکانیزم خرابی متفاوت ضمن قرارگیری در قسمت‌های متفاوت سازه موجب مستهلک شدن مقدار زیادی از انرژی ورودی به سیستم می‌شوند. بر این اساس از خرابی عضو یا اعضای اصلی سازه جلوگیری شده و قطعه با ایفای نقش فداشوندگی، به راحتی قابل تعمیر یا تعویض می‌باشد. از نمونه‌های کاربردی این قطعات می‌توان به استفاده میراگرهای تسلیمی مثلثی شکل (TADAS^۱) و X شکل (ADAS^۲) [۸، ۹]، قطعات پیوند قائم [۱۰] و پانل‌های برشی در مهاربندهای شورون و همچنین قطعات میراگر تسلیمی مرکزی [۱۱] و انتهایی [۱۲] اشاره نمود. استفاده از حلقه فولادی به عنوان یک میراگر تسلیمی انتهایی برای نخستین بار در سال ۱۳۸۵ در رساله دکتری کافی [۱۳] مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. در این راستا عندلیب و همکاران در سال ۲۰۱۴ میلادی [۱۲، ۱۴]، سعی در رفع محدودیت ناشی از ظرفیت باربری حلقه فولادی و استفاده آن در مهاربندهای دروازه‌ای نمودند. ایشان برای ساخت حلقه، از دو نیم حلقه جوش شده به یکدیگر استفاده کردند. این روش ساخت که در آن از پرس دو ورق فولادی به صورت نیم حلقه استفاده شده است، سبب گردید تا روند تولید حلقه با ظرفیت مناسب، سهل‌تر گردد [۱۴-۱۷].

از سوی دیگر تلاش‌ها برای جلوگیری از کماتش زود هنگام عضو مهاربند باعث گردید تا مهاربند مدفون در دیوار برشی به عنوان ایده اولیه کماتش‌ناپذیری توسط یوشینو و همکاران [۱۸]، مطرح شود. مهاربند کماتش‌ناپذیر مدفون در بتن و غلاف‌دار، مهاربندهای قرار گرفته در اجزای بتن آرمه و مهاربندهای کماتش‌ناپذیر امروزی با هسته فولادی به همراه غلاف بتنی، از دیگر تلاش‌های دانشمندان در عرصه تحقق بخشی به ایده کماتش‌تاب شدن عضو مهاربند به منظور افزایش شکل‌پذیری بوده است [۱۹]. سابلی و همکاران در سال ۲۰۰۱

^۱ Triangular Added Damping And Stiffness, TADAS
^۲ Added Damping And Stiffness, ADAS

میلادی [۲۰]، به بررسی و مدلسازی استفاده از مهاربندهای کمانش‌ناپذیر به صورت هم‌محور در قاب‌های ساختمانی ۳ و ۶ طبقه با یک و دو دهانه پرداخت. نتایج حاصل از این تحقیق در سال ۲۰۰۴ به صورت یک راهنما توسط آیین نامه سازه فولاد آمریکا منتشر گردید [۲۱]. ترمبلی و همکاران در سال ۲۰۰۶ میلادی [۲۲]، به بررسی ۶ نمونه آزمایشگاهی مهاربند کمانش‌ناپذیر با غلاف و طول متفاوت پرداختند. نتایج حاکی از ظرفیت استهلاک انرژی زیاد مهاربندها با غلاف کامپوزیتی و هسته مرکزی با طول کوتاه بود. مازولانی در سال ۲۰۰۸ میلادی [۲۳]، در یک آزمایش مقیاس کامل، از قطعات مهاربند کمانش‌ناپذیر طول کوتاه به عنوان عضوی از مهاربند فولادی، فیوز سازه‌ای، در مقاوم‌سازی یک ساختمان بتن آرمه استفاده نمود. در این راستا میرطاهری و همکاران در سال ۲۰۱۱ میلادی [۲۴]، به بررسی اثر طول مهاربند کمانش‌ناپذیر در میزان استهلاک انرژی به صورت آزمایشگاهی پرداختند. نتایج حاکی از ضریب استهلاک انرژی بالا برای قطعات با طول کوتاه تر بود. پس از آن استفاده از مهاربند کمانش‌ناپذیر طول کوتاه با مفهوم فیوز سازه‌ای در عضو مهاربند توسط هویدایی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۲۵]، کچویی و کافی [۲۶]، فنایی و دیزاجی [۲۷، ۲۸] و همچنین محمدی و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۲۹، ۳۰] مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت.

در پژوهش حاضر، هدف بررسی آزمایشگاهی فیوز کمانش‌ناپذیر کامپوزیتی نوین^۳، CBRF، برای استفاده به عنوان عضوی از مهاربندهای هم‌محور می‌باشد. این قطعه، تکامل یافته مهاربندهای کمانش‌ناپذیر طول کوتاه^۴، RL-BRBs، دارای عملکرد و ظرفیت باربری متفاوت در کشش و فشار است. استفاده از اعضای کششی مضاعف در یک طراح نوآورانه در این فیوز باعث شده است تا محدودیت ناشی از کاهش ظرفیت کششی مهاربندهای دارای RLBRB به عنوان فیوز سازه‌ای مرتفع گردد. در این مقاله پس از ارائه جزئیات فیوز پیشنهادی و پارامترهای موثر در طراحی، عملکرد لرزه‌ای آن به صورت آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- معرفی فیوز کمانش‌ناپذیر کامپوزیتی و نوآوری آن

فیوزها یا عناصر فدا شونده، قطعات جاری شونده ضعیفی هستند که در قسمتی از یک عضو و یا سازه قرار می‌گیرند تا خرابی‌های سازه‌ها به آنها خلاصه شود. طراحی مهاربندها در قاب‌های مهاربندی شده مبتنی بر محدود کردن خرابی‌های ناشی از زلزله به اعضای مهاربندی قاب به عنوان فیوزهای سازه‌ای می‌باشد. حال در اقدامی فراتر می‌خواهیم تا از خرابی اعضای مهاربندی شده نیز جلوگیری کرده و آن را به فیوزهای محوری استفاده شده در این اعضا خلاصه نماییم. ظرفیت فشاری مهاربندهای هم‌محور معمولاً کمتر از ظرفیت تسلیم آنها می‌باشد و اعضا قبل از تسلیم و بدون جذب انرژی کافی کمانه می‌کنند. کمانش موجب کاهش ظرفیت باربری و سختی قاب شده و در نتیجه جذب انرژی مناسبی صورت نمی‌گیرد. جهت بهبود رفتار اعضای مهاربندی و جلوگیری از کمانش و تخریب زودهنگام آن‌ها، فیوزی با ظرفیت کمتر از بار کمانش عضو مهاربند در آنها تعبیه می‌شود. این فیوز با در نظر گرفتن ضریب اطمینانی باید قبل از رسیدن مهاربند به بار کمانشی، تسلیم شده و مهاربند را در حالت الاستیک و بدون تخریب نگه دارد. از جمله مزیت‌های استفاده از قطعات فیوز، عدم بوجود آمدن مفصل پلاستیک در عضو اصلی مهاربند می‌باشد. قطعه فیوز با وارد شدن به فاز پلاستیک، در چرخه‌های رفت و بازگشت ناشی از زلزله، ضمن شکل‌پذیرتر نمودن قاب مهاربندی شده، خرابی‌ها را در خود متمرکز نموده و جذب انرژی می‌نماید.

از جمله نقدهای مطرح شده توسط پیمانکاران ساختمانی برای استفاده از قطعات فیوز سازه‌ای مانند RL-BRB، کاهش ظرفیت باربری جانبی سازه ضمن استفاده از این قطعات در سیستم برابر جانبی است. استفاده از قطعات فیوز سازه‌ای که عمدتاً دارای ظرفیت کششی و فشاری یکسانی می‌باشند باعث کاهش ظرفیت عضو مهاربند و محدود کردن ظرفیت آن به مقداری کمتر از ظرفیت فشاری مقطع می‌شوند. این قطعات عمدتاً بر اساس خرابی پیش از کمانش عضو مهاربند طراحی می‌شوند تا پیش از عضو مهاربند در فشار تسلیم شده و موجب استهلاک انرژی وارد شده به سازه گردند [۱۴، ۳۱]. حال با توجه به اینکه ظرفیت کششی عضو مهاربند معمولاً مقداری بیشتر از ظرفیت فشاری آن دارد، استفاده از این قطعات علاوه بر کاهش ظرفیت فشاری باعث کاهش ظرفیت کششی عضو مهاربند می‌شوند. این کاهش ظرفیت در کشش معمولاً مقداری بیشتر از فشار خواهد داشت. راه حل پیشنهادی طراحان سازه، استفاده از عضو مهاربند با مقطع بزرگتر و ظرفیت بیشتر برای رفع این کاهش ظرفیت بوده است که این امر پیمانکاران را از نظر اقتصادی با مشکلات روبرو ساخته است. به

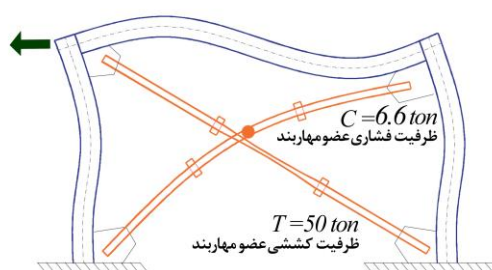
^۳ Composite Buckling Restrained Fuse, CBRF

^۴ Reduced Length Buckling Restrained Braces, RL-BRBs

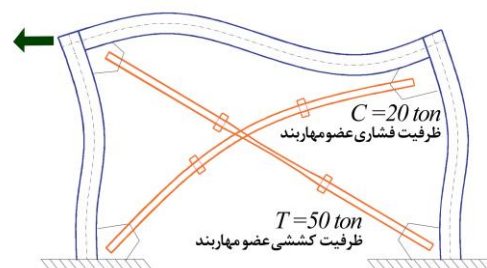
این دلیل استفاده از فیوزهای سازه‌ای مانند RL-BRB [۳۲] و حتی نمونه‌های دیگر مانند فیوز حلقه [۱۵]، تا به امروز با استقبال زیادی روبرو نبوده است.

فیوز نوین کمانش‌ناپذیر کامپوزیتی، CBRF، ارائه شده در این مطالعه، با ابعادی به نسبت کوچک، الهام گرفته شده از مهاربندهای کمانش‌ناپذیر^۵ و تکامل یافته‌ی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر طول کوتاه، RL-BRBs، می‌باشد که دارای رفتار و ظرفیت متفاوت در کشش و فشار است. این فیوز محوری به گونه‌ای طراحی شده است تا با قرارگیری در انتهای عضو مهاربندی نقش فیوز سازه‌ای را به خوبی ایفا کند. به این منظور بخش خارج از فیوز کمانش‌ناپذیر نبوده و فیوز به گونه‌ای طراحی شده است تا این بخش در حالت الاستیک و بدون خرابی باقی بماند. به طبع بدیهی است که ظرفیت عضو مهاربند ضمن استفاده از این فیوز سازه‌ای همانند دیگر فیوزهای معمول کاهش یابد. این در حالی است که استفاده از اعضای کششی مضاعف در یک طرح نوآورانه برای فیوز پیشنهادی، کاهش ظرفیت باربری کششی ایجاد شده در عضو مهاربند ناشی از استفاده فیوزهای معمولی سازه‌ای مانند RL-BRB و حلقه را مرتفع نموده است. از دستاوردهای این مقاله پیشنهاد فیوزی با ظرفیت کششی بیشتر از فشاری که متناسب با ظرفیت متفاوت کششی و فشار عضو مهاربند طراحی و ارائه شده است. در این وضعیت عضو مهاربند علاوه بر داشتن ظرفیت کششی مناسب، شکل‌پذیرتر از قبل به کارکرد خود ادامه می‌دهد.

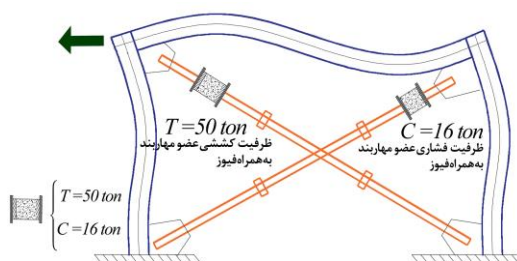
مفهوم اولیه ایده استفاده از CBRF در مهاربند هم‌محور در یک مثال عددی فرضی منطقی در شکل ۱، نشان داده شده است. علائم T و C به ترتیب نشان دهنده ظرفیت کششی و فشاری می‌باشند. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، یک مهاربند ضربدری بدون فیوز را در نظر بگیرید. مطالعات نشان داده است که عضو مهاربند پس از کمانش و بوجود آمدن مفصل پلاستیک در آن تا یک سوم ($1/3$) افت مقاومت در فشار از خود نشان می‌دهد [۳۳]، شکل ۱-ب. علاوه بر آن ضمن استفاده از فیوزهای معمولی مانند حلقه، کاهش ظرفیت هم در کشش و هم در فشار برای عضو مهاربند بوجود می‌آورد، شکل ۱-ج. ما در این مطالعه ارائه فیوزی را داریم که با ایفای نقش فداشوندگی علاوه بر جلوگیری از کمانش عضو مهاربند در فشار، کاهش ظرفیت کششی برای عضو مهاربند در بر نداشته و باعث ارتقای شکل‌پذیری سیستم نیز می‌گردد.



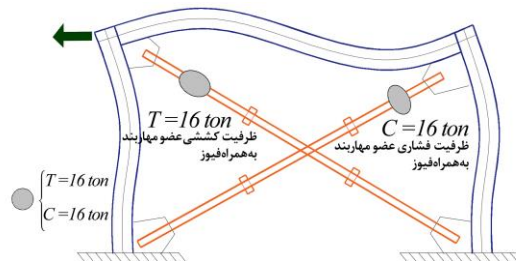
ب- ظرفیت باربری مهاربند هم‌محور پس از تجربه کمانش



الف- ظرفیت باربری مهاربند هم‌محور در آستانه تجربه کمانش



د- ظرفیت باربری مهاربند ضمن استفاده از CBRF

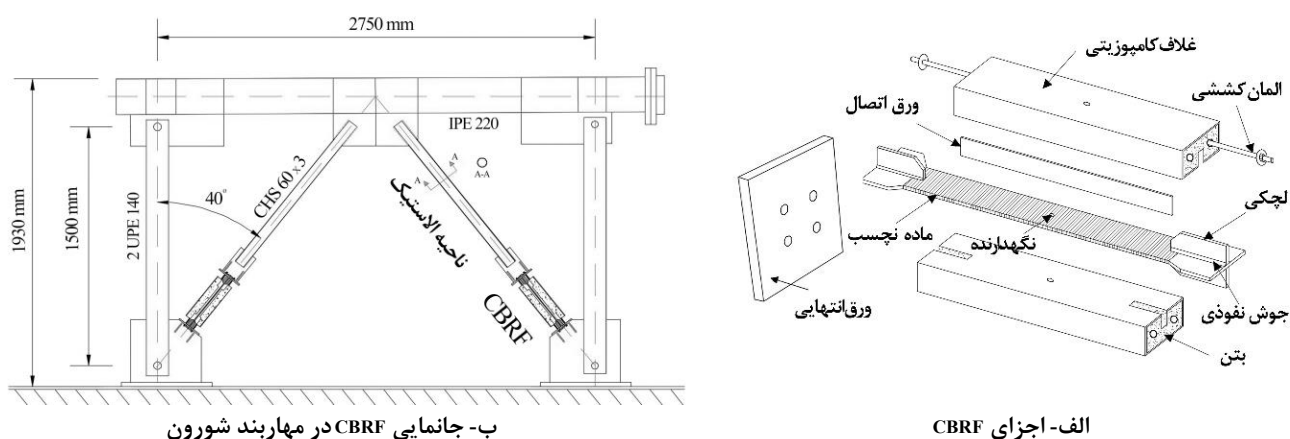


ج- ظرفیت باربری مهاربند ضمن استفاده از فیوز معمولی

شکل ۱: مفهوم اولیه ایده استفاده از CBRF در عضو مهاربند به صورت عددی فرضی

^۵ Buckling-restrained braces, BRBs

از دیگر ویژگی‌های این فیوز سازه‌ای می‌توان به استهلاک انرژی مناسب ضمن کارپذیری راحت اشاره نمود. این قطعه با ایفای نقش فداشوندگی در عضو مهاربند، مانع از تخریب زود هنگام عضو مهاربند شده و ضمن پلاستیک شدن مصالح خود، نیروی وارد شده به سیستم را مستهلک می‌نماید. علاوه بر این، طول کوتاه این فیوز راحتی استفاده و تعویض را نیز برای پیمانکاران ساختمانی به همراه خواهد داشت. این فیوز از یک هسته طول کوتاه فولادی به همراه اعضای کششی مضاعف تعبیه شده در یک غلاف کامپوزیتی ساخته شده است. نحوه قرارگیری این فیوز در یک مهاربند شورون و اجزای تشکیل دهنده آن در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: اجزای تشکیل دهنده فیوز نوین ارائه شده

طول کوتاه این فیوز کم‌انرژی‌ناپذیر، مستقیماً تأثیر به‌سزایی بر روی کاهش مصالح مصرفی استفاده شده در ساخت این قطعه نسبت به یک مهاربند کم‌انرژی‌ناپذیر طول کامل گذاشته و روند تولید این قطعه را نیز با کاهش هزینه اقتصادی در مقایسه با آن روبرو ساخته است. ضمناً تعویض پذیر بودن این فیوز پس از تجربه زلزله صرفه اقتصادی بیشتری را در مقایسه با تعویض کلی عضو مهاربند پس از کمانه کردن به همراه دارد. کم‌انرژی‌ناپذیری این فیوز به سیستم سازه‌ای نیز اضافه می‌گردد. طول کوتاه هسته مرکزی این فیوز کم‌انرژی‌ناپذیر باعث شده است تا این قطعه در جابجایی‌های نسبی یکسان، کرنش‌های بیشتری را نسبت به هسته یک مهاربند کم‌انرژی‌ناپذیر طول کامل تجربه نماید. این عامل خود باعث شده است تا هسته کوتاه^۷ این فیوز نسبت به طول کامل^۸ زودتر وارد فاز پلاستیک شده و استهلاک انرژی مناسب‌تری را انجام دهد. به همین دلیل تعیین طول مناسب برای فیوز یک پارامتر مهم و موثر در میزان شکل‌پذیری و استهلاک انرژی مناسب فیوز سازه‌ای است که در ادامه به آن پرداخته شده است.

۳- محاسبه طول هسته مرکزی فیوز

طراحی طول هسته مرکزی فیوز ارائه شده در این مطالعه، یک پارامتر مهم و موثر در میزان شکل‌پذیری، استهلاک انرژی و یقیناً ظرفیت باربری این قطعه می‌باشد به گونه‌ای که استفاده از طول نسبی بلندتر هسته مرکزی باعث می‌گردد تا سطح کرنش متوسط پایین‌تری توسط هسته مرکزی در یک جابجایی یکسان توسط فیوز تجربه شود. از دیدگاه دیگر انتخاب طول نسبی کوتاه‌تر هسته مرکزی نیز می‌تواند پتانسیل گسیختگی دفعی در مواجهه با پدیده خستگی کم چرخه را در کرنش‌های بالای مصالح هسته تحت بارگذاری چرخه‌ای در بر داشته باشد. به همین منظور نیاز است تا با مد نظر قرار دادن میزان جابجایی عضو مهاربند متناسب با جابجایی مجاز طبقه و نیز مد نظر قرار دادن پدیده خستگی برای تامین حداقلی طول مورد نیاز هسته، مقدار بهینه این طول محاسبه گردد.

با توجه به کوتاه بودن طول هسته مرکزی، L_c ، برای یک جابجایی نسبی یکسان هسته، Δ ، کرنش متوسط هسته، $\epsilon_{ca} = \Delta / L_c$ ، برای قطعه با طول هسته کوتاه‌تر مقدار بیشتری خواهد داشت. به همین منظور لازم است تا طول هسته مرکزی متناسب با میزان تقاضای

^۷ Short-length
^۸ Full-length

ماکزیمم کرنش^۸ هسته متناسب با ماکزیمم جابجایی محوری مجاز عضو مهاربند با مد نظر قرار دادن مقدار مجاز جابجایی نسبی طبقه^۹، θ ، طبق آیین‌نامه‌های ساختمانی، از رابطه (۱) محاسبه شود.

$$\Delta_b = \left(\theta \times \frac{\sin 2\theta}{2} \right) \times L_b \quad (1)$$

که در آن Δ_b و L_b به ترتیب نشان دهنده مقدار جابجایی مجاز محوری و طول عضو کامل مهاربند به همراه قطعه فیوز می‌باشند. علاوه بر آن ϕ بیانگر زاویه عضو مهاربند نسبت به افق و θ دریفت طبقه می‌باشد. با استفاده از این رابطه می‌توان جابجایی مجاز عضو مهاربند را به دست آورد. حال با توجه به نقش فداشوندگی قطعه فیوز و این که جابجایی مدنظر می‌بایست به قطعه فیوز وارد گردد، می‌توان با مد نظر قرار دادن کرنش متوسط هسته، حداکثر طول قطعه فیوز را محاسبه نمود.

$$L_c \leq \frac{\Delta_b}{\varepsilon_{ca}} \quad (2)$$

جاری شدن مصالح هسته مرکزی تحت بارگذاری چرخه‌ای می‌تواند احتمال شکست ناشی از پدیده خستگی با چرخه پایین را برای هسته مرکزی فیوز افزایش دهد. معمولاً ظرفیت خستگی با چرخه پایین متاثر از عواملی چون نوع مصالح مصرفی به کار رفته در قطعه و نوع پروتکل بارگذاری چرخه‌ای است. از نقطه نظر متالوژی میزان عمر خستگی^{۱۰} قطعه فولادی تحت بارگذاری سایکلیک از روابط کافین-منسون قابل محاسبه است که متناسب با نوع پروتکل بارگذاری و تعداد چرخه‌های رفت و بازگشتی می‌توان حداقل طول مناسب هسته مرکزی فیوز را پیش‌بینی نمود [۳۴]. رابطه کافین-منسون ارائه شده در رابطه (۲)، جز متعارف‌ترین روابط خستگی کم چرخه می‌باشد که دامنه کرنش کل در آن به دو قسمت الاستیک و پلاستیک تقسیم می‌شود.

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f (2N_f)^c \quad (3)$$

که در آن $\Delta \varepsilon$ ، دامنه کرنش، $\Delta \varepsilon_e$ ، دامنه کرنش الاستیک، $\Delta \varepsilon_p$ ، دامنه کرنش پلاستیک، E ، مدول الاستیسیته فولاد، ε_f ، ضریب شکل‌پذیری خستگی، σ_f ، ضریب مقاومت خستگی، N_f ، تعداد چرخه بارگذاری قطعه و b و c ، نمای مقاومت خستگی و نمای شکل‌پذیری خستگی مصالح مورد استفاده می‌باشند که مقادیر این پارامترها از نتایج آزمایشگاهی مصالح با دامنه ثابت بارگذاری به دست می‌آید. با توجه به کوچک بودن مقدار کرنش الاستیک نسبت به کرنش پلاستیک در رابطه (۳)، می‌توان از آن صرف نظر نمود [۳۵]. می‌دانیم که در جریان وقوع زلزله‌ها با دامنه ثابتی از بارگذاری چرخه‌ای روبرو خواهیم بود به این منظور از تحلیل آسیب انباشته که روشی برای تحلیل خستگی با دامنه متغییر و منظم تک محوری است، استفاده شده است. در این روش که به ماینر معروف است از تعریف یک شاخص شمارنده تجمعی آسیب چرخه‌ای به صورت نشان داده شده در رابطه (۳) استفاده می‌شود.

$$\sum \frac{n_i}{(N_f)_i} = D \quad (4)$$

که در آن n_i ، تعداد چرخه‌ها با سطح تنش σ_i و $(N_f)_i$ ، تعداد چرخه‌های عمر خستگی مصالح در سطح تنش σ_i می‌باشد. پارامتر D که عمده‌تاً با استفاده از آزمایش به دست می‌آید، میانگین تقریبی واحد، را دارا می‌باشد که به منظور محاسبه حداقل طول هسته مرکزی، این مقدار کمتر از واحد تخمین زده شده است. در شکل ۳ نمونه بارگذاری خستگی در روش ماینر آورده شده است.

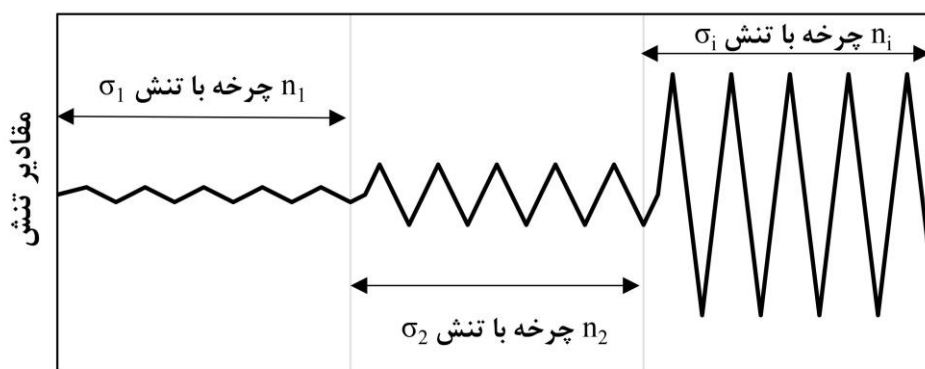
با قرار دادن رابطه (۳) در رابطه (۴)، خواهیم داشت:

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{\frac{1}{2} \times \left(\frac{\Delta \varepsilon_i}{2 \times \varepsilon_f} \right)^{\frac{1}{c}}} \leq 1 \quad (5)$$

^۸ Strain demand

^۹ Story drift

^{۱۰} Fatigue life



چرخه‌های بارگذاری

شکل ۳: نمونه بارگذاری با دامنه تنش‌های متفاوت

که در آن m تعداد چرخه‌های پلاستیک پروتکل بارگذاری و $\Delta\varepsilon_i$ مقدار کرنش ایجاد شده در چرخه i می‌باشد، بنابراین:

$$\Delta\varepsilon_i = 2 \frac{\Delta_i}{L_c} \quad (6)$$

که در آن Δ_i میزان دامنه تغییر شکل ایجاد شده در چرخه i و L_c طول هسته مرکزی فیوز می‌باشد. با قرار دادن رابطه (۶) در رابطه (۵) و ساده سازی روابط و همچنین در نظر گرفتن مقداری منفی برای پارامتر c ، خواهیم داشت [۲۴]:

$$L_c \geq \left(\frac{1}{\varepsilon_f}\right) \times \lambda^{|c|} \quad (7)$$

که در آن پارامتر λ ، به صورت رابطه (۸) می‌باشد.

$$\lambda = (2n_1 \times \Delta_1^{\frac{|c|}{2}} + 2n_2 \times \Delta_2^{\frac{|c|}{2}} + \dots + 2n_m \times \Delta_m^{\frac{|c|}{2}}) \quad (8)$$

برای مصالح معمول، ضریب شکل‌پذیری خستگی، ε_f ، برابر کرنش نهایی مصالح در کشش می‌باشد. روابط (۲) و (۷) مرزهای طول بهینه هسته مرکزی را مشخص می‌کنند.

۴- طراحی و جزئیات ساخت فیوز نوین پیشنهادی

۴-۱- مصالح

مصالح به کار رفته در ساخت این قطعه کامپوزیتی متشکل از بتن معمولی و فولاد نرمه ساختمانی، ST37-2 [۳۶]، بوده است. مشخصات مصالح فولادی مورد استفاده در این فیوز شامل ورق هسته مرکزی و همچنین میلگرد استفاده شده به عنوان اعضای کششی از آزمایش کوپن تحت بار کششی مونوتیک استخراج گردید [۳۷]. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱ آورده شده است. در این قطعه از بتن معمولی به عنوان پرکننده مقاطع قوطی شکل غلاف فولادی به منظور افزایش ممان اینرسی برای ممانعت از کمانش هسته فولادی استفاده شده است. به دلیل کوچک بودن ابعاد مقاطع غلاف و علاوه بر آن قرارگیری آرماتورهای کششی در این ناحیه، از بتن معمولی با کارایی بالا و سنگدانه با دانه‌بندی ریز (کمتر از ۱۲ میلی‌متر) به همراه روان کننده (۰/۵٪ مایع نسب به وزن سیمان) استفاده شده است. نتایج آزمایش فشار نمونه‌های مکعبی ۷ و ۲۸ روزه این بتن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات مصالح

		فلاد		
بتن		ورق هسته مرکزی	میلگردهای کششی	ورق مقاطع
۴۶/۳	(MPa) مقاومت فشاری ۷ روزه	۲۹۰/۳۸	۲۸۵/۱	۳۱۰/۵۲
		۴۱۱/۶۳	۳۸۸/۳۷	۴۰۲/۱
		۲/۲۹۶×۱۰ ^۵	۲/۲۵۲×۱۰ ^۵	۲/۲۳۱×۱۰ ^۵
۵۱	(MPa) مقاومت فشاری ۲۸ روزه	۰/۰۱۷۴	۰/۰۱۰۵	۰/۰۱
		۲۵/۰۲	۱۵/۵	۱۴/۱

۴-۲- طراحی اجزا فیوز

برای طراحی فیوز کمانش ناپذیر کامپوزیتی، CBRF، لازم است تا پیش از طراحی مقادیر حداکثر ظرفیت فشاری و کششی عضو مهاربند محاسبه شود. هسته مرکزی در فیوز پیشنهادی وظیفه انتقال توامان نیروی محوری فشاری و کششی ضمن بارگذاری چرخه‌ای را به عهده دارد و این در حالی است که اعضای کششی نوآورانه تنها در کشش باربری داشته و هیچگونه باربری توسط آن‌ها در چرخه‌های فشاری صورت نمی‌گیرد. ابعاد هسته مرکزی فولادی لازم است به گونه‌ای طراحی شوند که با قرارگیری عضو مهاربند تحت نیروی محوری فشاری، این قطعه با ایفای نقش فداشوندگی و در نیروی پایین‌تر از ظرفیت فشاری عضو مهاربند، ضمن در نظر گرفتن یک ضریب کاهش مقاومت، ψ ، جاری شده و علاوه بر مستهلک نمودن نیروی وارد به سیستم، مانع از کمانش زود هنگام عضو مهاربندی گردد. رابطه (۹).

$$P_{y-fuse} \leq \psi P_{cre-brace} \quad (9)$$

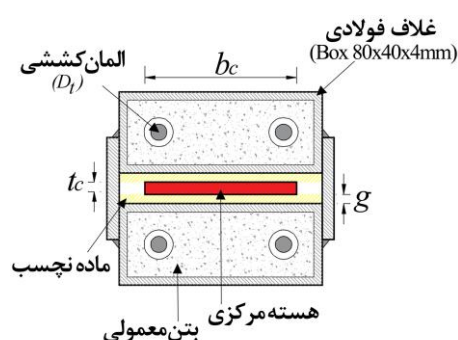
که در آن P_{y-fuse} ، نیروی جاری شدن هسته فیوز و برابر ضرب سطح مقطع هسته فولادی، A_c ، در تنش تسلیم مصالح آن می‌باشد. ψ ، ضریب کاهش مقاومت و $P_{cre-brace}$ مقدار نیروی بحرانی عضو مهاربند برای رسیدن به کمانش اولیه سرتاسری در آن است. تعیین ضریب کاهش مقاومت نیازمند یک کار تحقیقاتی قابل ملاحظه می‌باشد که در موضوع این مطالعه نمی‌گنجد. مقدار این ضریب در این مطالعه به صورت محافظه کارانه متناسب با شرایط آزمایشگاه برابر ۰/۵۵، به صورت تجربی منطقی در نظر گرفته شده است. این مقدار در مطالعات کچویی و کافی [۲۶] برای فیوز با کاهش مقطع عضو برابر ۰/۸ و در مطالعات دیگر توسط کافی [۱۳]، عندلیب و همکاران [۱۴]، پاندیکاو و همکاران مقداری بین ۰/۵ تا ۰/۷ [۳۱] به منظور قطعیت بخشیدن به تخریب عضو فیوز پیش از کمانش اصلی مهاربند برای ظرفیت فشاری فیوز در نظر گرفته شده است. به طبع مطالعات صورت گرفته در این مقاله جنبه آزمایشگاهی داشته و در زمان تولید این فیوز به دور از محافظه کاری می‌توان این ضریب را متناسب با نتایج این تحقیق مقداری بیشتر در نظر گرفت.

در این مطالعه با در نظر گرفتن قاب موجود در شکل ۲-ب و استفاده از ضوابط موجود در آیین‌نامه AISC341 [۳۸] برای طرح لرزه‌ای مهاربندهای هم‌محور مقدار بار بحرانی عضو مهاربند، برای مقطع لوله‌ای (۳×۶۰ CHS) با طول ۱۶۵۰ میلی‌متر، برابر ۱۰۵ کیلونیوتن محاسبه گردید که با در نظر گرفتن ضریب کاهش مقاومت، سطح مقطع هسته مرکزی این فیوز برابر ۲۱۰ میلی‌متر مربع محاسبه گردید که به این منظور از ورق فولادی با ابعاد ۵×۴۲ میلی‌متر و مشخصات موجود در جدول ۱ استفاده شده است.

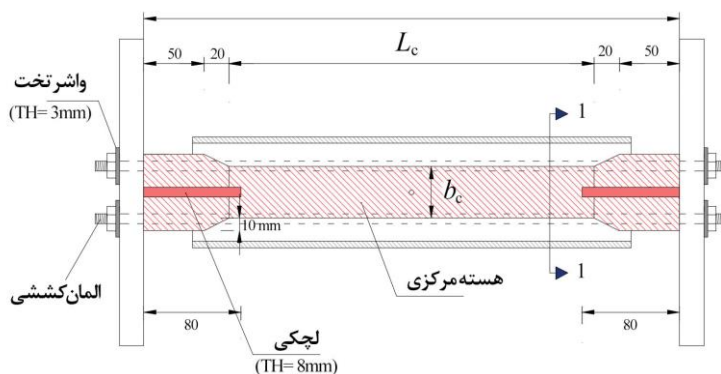
به منظور تامین میزان جابجایی مجاز طبقه، $\theta = 2\%$ ، تحت خطر زلزله طرح^۱، مقدار جابجایی عضو مهاربند نشان داده شده در شکل ۲-ب حدوداً ۱۶/۲ میلی‌متر از رابطه (۱) محاسبه گردید که می‌توان با در نظر گرفتن حداکثر میزان کرنش متوسط هسته مرکزی برابر ۰/۵٪ در رابطه (۲) این جابجایی را در یک هسته با طول ۳۰۰ میلی‌متری ارضا نمود. علاوه بر این، با در نظر گرفتن سختی بی‌نهایت برای این قاب طبق فرضیات صورت گرفته توسط هویدایی و همکاران [۲۵]، برای هسته با تنش تسلیم ۲۹۰ مگاپاسکال، حداکثر طول هسته مرکزی فیوز حدوداً برابر ۰/۲ طول مهاربند محاسبه گردیده که تصدیق کننده محاسبات صورت گرفته می‌باشد. لازم به ذکر است که احتمال وقوع شکست ناشی از پدیده خستگی نیز با افزایش رفتار پلاستیک هسته مرکزی افزایش خواهد یافت که به منظور ممانعت از این پدیده لازم است تا رابطه (۷) بسته به بارگذاری چرخه‌ای بررسی گردد که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. در شکل ۴ ابعاد در نظر

^۱ Design Basis Earthquake (DBE) hazard level

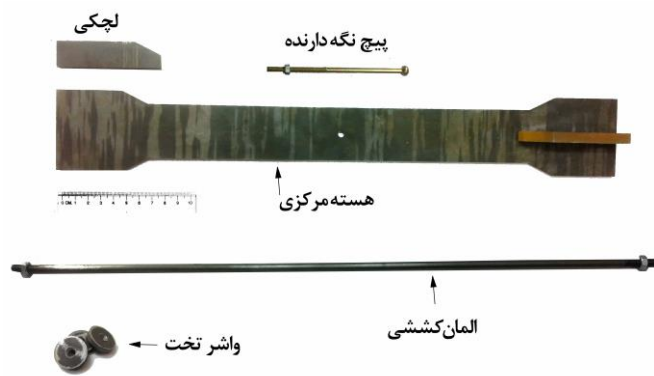
گرفته برای نمونه و جزئیات ساخت اجزای تشکیل دهنده فیوز پیشنهادی نشان داده شده است. در این اشکال L_c ، b_c ، t_c نشان دهنده طول، عرض و ضخامت هسته مرکزی، g بیان کننده فاصله آزاد میان غلاف و هسته مرکزی و D_t قطر اعضای کششی مضاعف را بیان می کند. اعضای کششی مضاعف استفاده شده در این فیوز متناسب با میزان دررفت مجاز طبقه و همچنین متناسب با ظرفیت کششی عضو مهاربند قابلیت طراحی دارند که برای این مطالعه از چهار آرماتور با قطر ۸ میلی متر استفاده شده است.



د- فیوز ساخته شده



الف- جزئیات و ابعاد فیوز پیشنهادی (ابعاد به میلی متر)



ج- جزئیات ساخته شده فیوز

شکل ۴: ابعاد و جزئیات فیوز پیشنهادی از طرح تا ساخت

۵- طرح مطالعه آزمایشگاهی

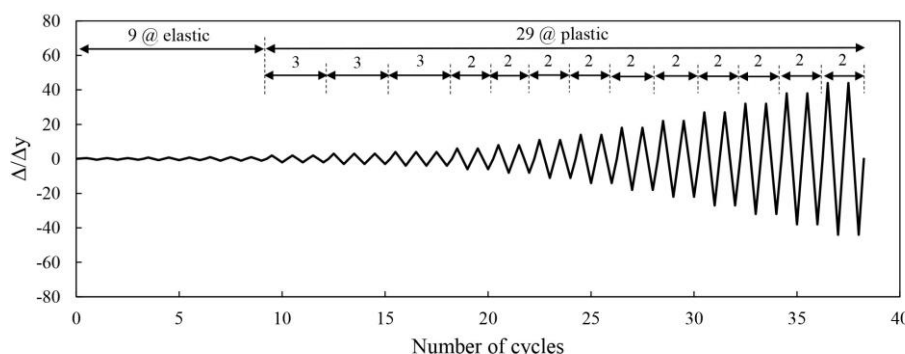
به منظور شناخت چگونگی رفتار فیوز کمانش ناپذیر کامپوزیتی، CBRF، در برابر زلزله و بررسی عملکرد اعضای کششی مضاعف و همچنین به منظور بررسی پارامترهای موثر در ساخت، تولید و استفاده این قطعه، دو نمونه از این فیوز طراحی و ساخته شد و در آزمایشگاه سازه دانشگاه سمنان تحت بار چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. برای مقایسه رفتار قطعه فیوز پیشنهادی، نمونه آزمایشگاهی نخست یک مهاربند کمانش ناپذیر طول کوتاه، RL-BRB، با ابعاد یکسان با نمونه دوم اما بدون عضو کششی به عنوان نمونه کنترل در نظر گرفته شده است. در نمونه دوم از اعضای کششی مضاعف استفاده گردید. در جدول ۲، جزئیات ابعادی نمونه‌های ساخته شده، آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

شماره	نام نمونه‌های آزمایشی	هسته مرکزی	فاصله آزاد غلاف	قطر اعضا کششی
		t_c (mm)	g (mm)	D_t (mm)
۱	RL-BRB	۵	۲	-
۲	CBRF	۵	۲	۸

۵-۱- پروتکل بارگذاری و بررسی طول خستگی

سیستم‌های سازه‌ای اغلب رفتاری غیرخطی در برابر تحریکات طبیعی مانند زلزله از خود نشان می‌دهند. در این شرایط سازه‌ها و قطعات تحت بارهای رفت و بازگشتی چرخه‌ای، ضمن رفتار هیستریزس جذب انرژی نموده و نیروی وارد بر قطعه را ضمن تغییر شکل مستهلک می‌نمایند. در این پژوهش از پروتکل بارگذاری چرخه‌ای پیشنهادی گزارش ATC24 [۳۹] به صورت نشان داده شده در شکل ۵ استفاده شده است که در آن تغییر مکان تسلیم قطعه، Δ_y ، مبنای اعمال بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد.



شکل ۵: پروتکل بارگذاری

با توجه به کوتاه بودن طول هسته مرکزی، لازم است تا مقدار این طول برای جلوگیری از شکست دفعی ناشی از پدیده کم چرخه طبق رابطه (۷) مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور با در نظر گرفتن چرخه‌های پلاستیک، رابطه (۵) به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\frac{3}{\frac{1}{2} \times \left(\frac{\Delta_y}{L_c \times \varepsilon_f}\right)^{\frac{1}{c}}} + \frac{3}{\frac{1}{2} \times \left(\frac{2\Delta_y}{L_c \times \varepsilon_f}\right)^{\frac{1}{c}}} + \dots + \frac{2}{\frac{1}{2} \times \left(\frac{6\Delta_y}{L_c \times \varepsilon_f}\right)^{\frac{1}{c}}} + \frac{2}{\frac{1}{2} \times \left(\frac{8\Delta_y}{L_c \times \varepsilon_f}\right)^{\frac{1}{c}}} + \dots \leq 1 \quad (10)$$

با توجه به اینکه پارامتر c ، مقدار منفی دارد، رابطه (۱۰) به صورت رابطه (۱۱) قابل بازنویسی است:

$$(6 \times (1)^{\frac{1}{|c|}} + 6 \times (2)^{\frac{1}{|c|}} + \dots + 4 \times (6)^{\frac{1}{|c|}} + 4 \times (8)^{\frac{1}{|c|}} + \dots) \times \left[\left(\frac{\Delta_y}{L_c \varepsilon_f}\right)^{\frac{1}{|c|}} \right] \leq 1 \quad (11)$$

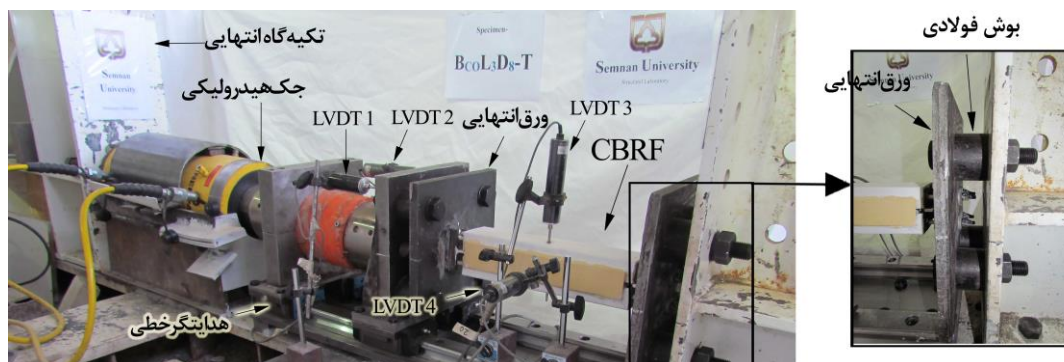
حال با در نظر گرفتن مقدار تغییر مکان تسلیم قطعه برابر با $0/38$ میلی‌متر و همچنین مقدار $\varepsilon_f = 0/25$ طبق مشخصات مصالح ارائه شده در جدول ۱، و علاوه بر آن استفاده از مقدار پارامتر c برابر $-0/458$ ، به دست آمده توسط مطالعات یوریتس [۴۰]، مقدار حداقل طول هسته فولادی برابر 212 میلی‌متر به دست آمده است که تصدیق کننده مقدار مد نظر قرار داده شده برای ساخت این فیوز می‌باشد.

۵-۲- پیکربندی آزمایش

در این مطالعه از یک پیکربندی^{۱۲} محوری شامل جک هیدرولیکی دوطرفه با قابلیت اعمال بار فشاری 2000 kN و بار کششی 1000 kN ضمن جابجایی ± 100 mm استفاده شده است. لودسل^{۱۳} مورد استفاده در این آزمایش قابلیت اندازه‌گیری تا نیروی 1000 kN را دارا بوده و از یک سیستم هدایتگر خطی (ریل و واگن) برای ممانعت از حرکت خارج از محور سیستم بارگذاری استفاده شده است. همانگونه که در شکل ۶ این پیکربندی به تصویر کشیده شده است، ورق انتهایی قطعه در یک سمت توسط پیچ و مهره به تکیه‌گاه انتهایی متصل گردیده و در انتهای سمت دیگر به سیستم بارگذاری متصل می‌باشد. از دو جابجایی سنج محوری افقی قرار گرفته بر روی صفحه انتهایی برای اندازه‌گیری میزان جابجایی محوری قطعه تحت بارگذاری استفاده گردید. علاوه بر آن دو جابجایی سنج دیگر نیز بر روی غلاف

¹² Setup
¹³ loadcell

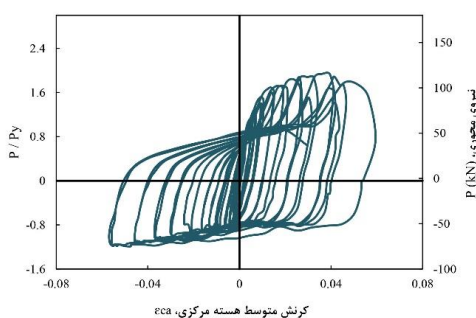
نصب گردید. شکل ۶ نحوه قرارگیری قطعه CBRF در پیکربندی آزمایش را نشان می‌دهد. از بوش‌های فولادی برای ایجاد فاصله میان ورق و تکیه‌گاه انتهایی، به منظور جانمایی اعضای کششی استفاده گردید. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، پیچ‌ها با گذر از سوراخ موجود در بوش‌های فولادی، به تکیه‌گاه‌ها متصل شده‌اند.



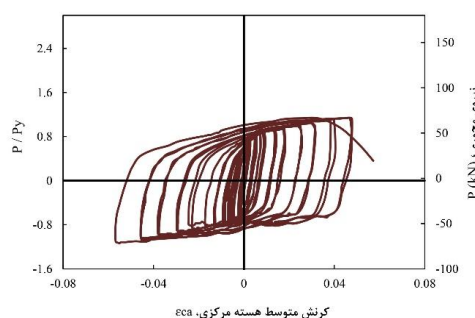
شکل ۶: پیکربندی آزمایش

۳-۵- تحلیل نتایج آزمایش

نمودار هیستریزس نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل‌های ۷-الف و ب نشان داده شده است. علاوه بر آن شکل ۸-الف مقایسه منحنی‌های برازش^{۱۴} هیستریزس و شکل ۸-ب مقایسه نمودار استهلاک انرژی نمونه‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

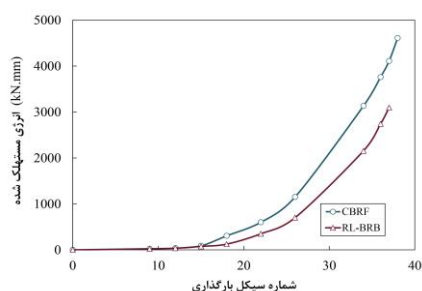


ب- نمودار هیستریزس CBRF

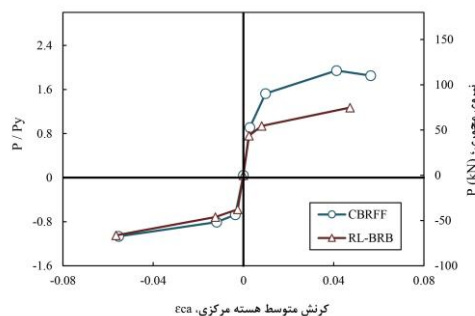


الف- نمودار هیستریزس RL-BRB

شکل ۷: پاسخ هیستریزس نمونه‌های آزمایش شده



ب- مقایسه منحنی‌های انرژی مستهلک شده



الف- مقایسه منحنی‌های برازش شده هیستریزس

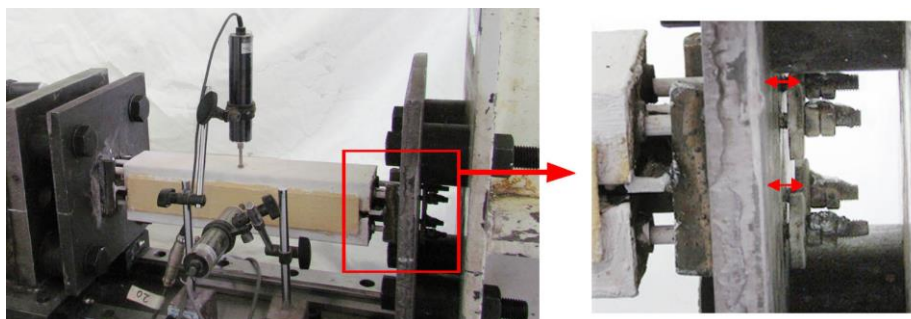
شکل ۸: مقایسه منحنی‌های برازش هیستریزس و انرژی مستهلک شده نمونه‌های آزمایشگاهی

آزمایش مهاربند کمانش‌ناپذیر طول کوتاه (RL-BRB) به عنوان نمونه کنترل باعث گردید تا عملکرد اعضای کششی مضاعف بتواند آشکارا نشان داده شود. همانطور که در شکل ۷-الف دیده می‌شود، چرخه‌های هیستریزیس نمونه آزمایشگاهی شماره ۱ پیوسته و پایدار بوده است. این قطعه دارای ماکزیمم نسبت باربری، P/Py ، تقریباً یکسان در کشش و فشار بوده به گونه‌ای که مقدار دقیق این نسبت در فشار برابر $1/2$ و در کشش برابر مقدار $1/1$ به دست آمده است. بخش دندانه‌ای موجود در نمودار شکل ۷-الف در ناحیه فشاری، نشان دهنده کاهش ظرفیت^{۱۵} آنی هسته می‌باشد. این تنزل در ظرفیت باربری ناشی از بوجود آمده مدهای کمانشی در هسته فولادی ضمن اعمال فشار محوری می‌باشد. محدودیت ایجاد شده ناشی از استفاده غلاف برای هسته مرکزی (کمانش‌ناپذیر شدن هسته)، در این فیوز باعث گردید تا هسته مرکزی با وارد شدن به مدهای کمانشی بالا، باربری خود را در فشار افزایش دهد.

نمودار هیستریزیس فیوز پیشنهادی این مطالعه، CBRF، در شکل ۷-ب نشان داده شده است. این نمودار نیز همانند شکل ۷-الف دارای چرخه‌های پیوسته و پایدار می‌باشد. استفاده از اعضای کششی مضاعف در این قطعه باعث شده است تا نمودار هیستریزیس این فیوز در ناحیه کششی، کشیده‌تر شده و انرژی بیشتری مستهلک گردد و علاوه بر آن این قطعه مقاومت کششی بالاتری نسبت به RL-BRB تجربه نماید. ماکزیمم نسبت باربری، P/Py ، برای فیوز پیشنهادی در فشار مقداری مشابه RL-BRB و برابر $1/2$ می‌باید با این تفاوت که در کشش این مقدار به $1/9$ نیز می‌رسد. متوسط کرنش هسته مرکزی CBRF در انتهای چرخه ۳۷ ام مقدار $0.5/5\%$ را به خود اختصاص داده است.

شکل ۸-ب میزان استهلاک انرژی صورت گرفته توسط CBRF و RL-BRB را نشان می‌دهد. طبق انتظار میزان استهلاک انرژی صورت گرفته توسط CBRF بیشتر از RL-BRB می‌باشد به گونه‌ای مقادیر این استهلاک انرژی در انتهای چرخه ۳۶ ام به ترتیب برابر 3758 kN.mm و 2740 kN.mm می‌باشد.

شکل ۹-الف نحوه عملکرد مجزای اعضای کششی در چرخه‌های فشاری را در حین آزمایش به تصویر کشیده است. تغییر شکل یافته هسته مرکزی و غلاف کامپوزیتی فیوز پیشنهادی پس از آزمایش نیز در شکل ۹-ب نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، هسته دارای کمانش‌های موضعی ناشی از ایجاد مدهای کمانشی می‌باشد.



الف- عملکرد اعضای کششی مضاعف در حین بارگذاری فشاری



ب- تغییر شکل هسته مرکزی
شکل ۹: مشاهدات آزمایش

^{۱۵} Bearing degradation

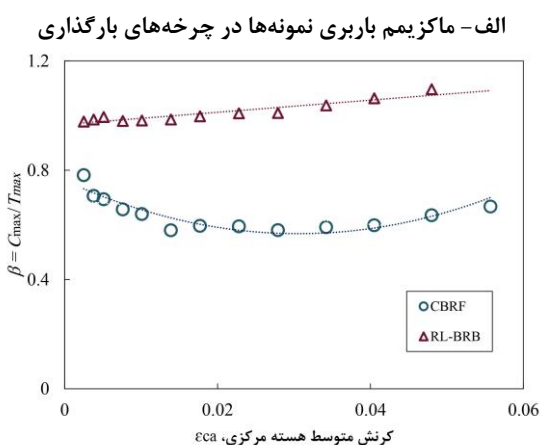
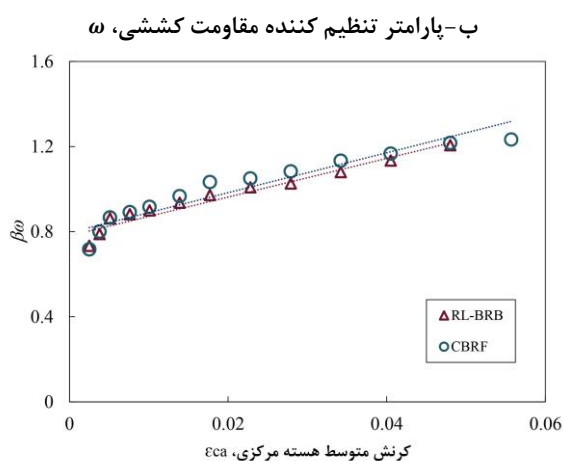
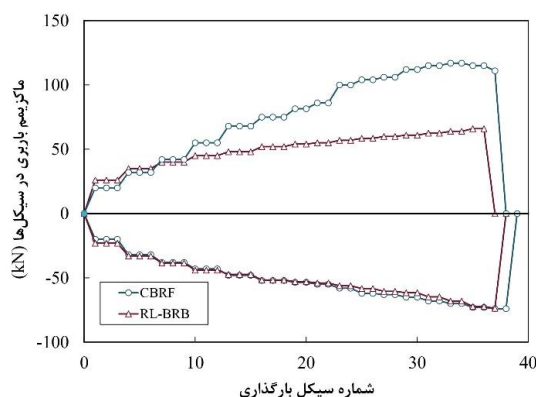
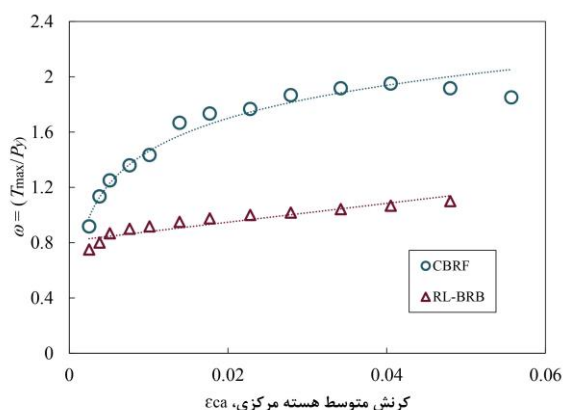
۵-۳-۱- ظرفیت باربری در چرخه‌های متوالی

ظرفیت باربری قطعه در چرخه‌های متوالی نشان دهنده توانایی فیوز برای مقاومت در برابر نیروی محوری است [۳۲]. شکل ۱۰- الف ماکزیمم باربری نمونه‌های آزمایشگاهی در چرخه‌های متوالی بارگذاری را به صورت مجزا نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، اختلاف باربری دو نمونه آزمایشگاهی در چرخه‌های فشار بسیار کم بوده است که تصدیق کننده عملکرد مجزای هسته مرکزی در فشار می‌باشد. اختلاف باربری این دو نمونه در چرخه‌های کششی با ورود به چرخه‌های غیر خطی بیشتر و بیشتر شده تا اینکه این اختلاف در بیشترین مقدار خود به حدود ۶۰ kN می‌رسد. این اختلاف ناشی از استفاده اعضای کششی مضاعف در فیوز پیشنهادی می‌باشد.

۵-۳-۲- پارامترهای تنظیم مقاومت^{۱۶}

با توجه به رفتار متفاوت مهاربندهای کمانش‌ناپذیر در فشار و کشش تحت بار چرخه‌ای، از پارامترهای تنظیم مقاومت به منظور ساده سازی محاسبات طراحی در تعیین مقادیر مقاومت ماکزیمم این قطعات استفاده می‌شود. این پارامترها عمدتاً توسط کارخانه‌های تولیدی این قطعات طی بررسی رفتار سایکلک آن‌ها محاسبه و در اختیار طراحان سازه قرار می‌گیرد. در این پژوهش نیز به منظور استفاده از این قطعات، پارامترهای تنظیم مقاومت شامل ω و β برای نمونه‌های آزمایش شده محاسبه شده است.

پارامتر تنظیم کننده مقاومت کششی، ω ، بیان کننده میزان کرنش سخت‌شدگی قطعه، از نسبت ماکزیمم نیروی کششی (T_{max}) به نیروی جاری شدن کششی قطعه (P_y) محاسبه می‌شود. شکل ۱۰-ب رابطه میان مقادیر متفاوت ω نسبت به کرنش متوسط هسته مرکزی در چرخه‌های مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد. مقدار ماکزیمم این پارامتر برای CBRF تقریباً برابر با ۱/۹ می‌باشد.

د- پارامتر کلی تنظیم کننده مقاومت، $\beta \times \omega$ ج- پارامتر تنظیم کننده مقاومت فشاری، β

شکل ۱۰: ماکزیمم باربری و منحنی پارامترهای تنظیم کننده مقاومت برای نمونه‌های آزمایش شده

^{۱۶} Strength adjustment factors

پارامتر تنظیم کننده مقاوت فشاری، β ، بیان کننده نسبت میان ماکزیمم نیروی فشاری محوری (C_{max}) به ماکزیمم نیروی کششی مربوط به یک سطح کرنش ثابت می باشد. شکل ۱۰-ج رابطه میان مقادیر متفاوت β نسبت به کرنش متوسط هسته مرکزی در چرخه های بارگذاری مختلف را نشان می دهد. طبق انتظار تغییرات این پارامتر برای RL-BRB ضمن افزایش کرنش متوسط هسته مرکزی، ε_{ca} ، با شیب مثبت روبرو بوده است به گونه ای که ماکزیمم مقدار آن برابر ۱/۱ در انتهای چرخه ۳۶ ام به دست آمده است. شیب مثبت پارامتر β برای RL-BRB ناشی از افزایش باربری هسته مرکزی در فشار ضمن وارد شدن به مدهای کمانشی بالاتر می باشد. این در حالی است که پارامتر β برای CBRF در ابتدا با شیب منفی و سپس با افزایش شیب ضمن افزایش کرنش متوسط هسته، روبرو بوده است. شیب منفی این منحنی برای CBRF ناشی از وجود و عملکرد اعضای کششی مضاعف می باشد. عملکرد توامان هسته مرکزی و اعضای کششی مضاعف باعث افزایش مقدار باربری این فیوز در کشش نسبت به عملکرد تنه های هسته مرکزی شده است. شیب مثبت برای CBRF ناشی از افزایش باربری هسته مرکزی در فشار ضمن وارد شدن به مدهای کمانشی بالاتر می باشد.

پارامتر کلی تنظیم کننده مقاومت، $\beta\omega$ ، به صورت حاصل ضرب مقادیر پارامترهای β در ω محاسبه می شود. رابطه میان مقادیر به دست آمده برای این پارامتر ضمن افزایش کرنش هسته مرکزی برای نمونه های آزمایش شده در شکل ۱۰-د آورده شده است. مقدار ماکزیمم این پارامتر برای فیوز پیشنهادی برابر ۱/۲۳ به دست آمده است.

۶- نتیجه گیری

فیوز یا عناصر فداشونده، قطعات جاری شونده ضعیفی هستند که بسته به نوع باربری آن ها در قسمت های مختلف سازه قرار می گیرند تا خرابی های سازه ناشی از بیش بارگذاریها در آن ها خلاصه شود. فیوز کمانش ناپذیر کامپوزیتی، CBRF، ارائه شده در این مقاله یک فیوز محوری طراحی شده به منظور جا نمایی در عضو مهاربندی هم محور می باشد. این قطعه که الهام گرفته از مهاربند های کمانش ناپذیر می باشد، با طول هسته کوتاه، تکامل یافته مهاربند های کمانش ناپذیر طول کوتاه، RL-BRBs، با رفتار و ظرفیت متفاوت در کشش و فشار می باشد. نتایج این مطالعه به صورت زیر است:

- در این مطالعه روابط پیشنهادی برای محاسبه طول بهینه هسته مرکزی برای مهاربند های کمانش ناپذیر طول کوتاه ضمن در نظر گرفتن محدودیت های جابجایی مجاز طبقه و همچنین طول عمر خستگی قطعه در بارگذاری ها چرخه ای، ارائه شده است.
- اعضای کششی مضاعف در نظر گرفته شده برای فیوز پیشنهادی در یک طرح نوآورانه باعث افزایش ظرفیت فیوز در باربری کششی گردیده است. این افزایش ظرفیت در فیوز پیشنهادی، کاهش ظرفیت و محدودیت های باربری کششی اعضای مهاربند ضمن استفاده از فیوز های معمولی مانند RL-BRB در عضو مهاربند را جبران می نماید.
- استفاده از اعضای کششی مضاعف علاوه بر افزایش ظرفیت کششی فیوز، به موجب کشیده تر کردن نمودار هیستریزیس در ناحیه کششی باعث افزایش استهلاک انرژی صورت گرفته شده توسط این فیوز شده است.
- آزمایش های صورت گرفته بر روی قطعه فیوز پیشنهادی نشان داد که CBRF از بهبود مطلوبی در ظرفیت کششی و استهلاک انرژی همراه با چرخه های هیستریزیس پیوسته و پایدار برخوردار است. نتایج حاکی از ماکزیمم نسبت باربری ۱/۲ به ۱/۹ به ترتیب در کشش و فشار برای فیوز پیشنهادی بوده است. این مقادیر برای RL-BRB برابر ۱/۲ و ۱/۱ می باشند. اختلاف ناشی از بکارگیری اعضای کششی مضاعف در CBRF است.
- پارامتر تنظیم کننده مقاومت فشاری، β ، ضمن افزایش کرنش متوسط هسته برای RL-BRB دارای شیب تغییرات مثبت می باشد. ماکزیمم مقدار این پارامتر برای RL-BRB برابر ۱/۱ به دست آمده است. این در حالی است که تغییرات این نسبت برای CBRF دارای شیب کلی منفی ناشی از افزایش ظرفیت باربری کششی ضمن استفاده از اعضای کششی مضاعف به عنوان یکی از اهداف اولیه این مطالعه می باشد.

- مقدار ماکزیمم پارامتر تنظیم کننده مقاومت کششی، ω ، و همچنین مقدار ماکزیمم پارامتر کلی تنظیم کننده مقاومت، $\omega\beta$ ، برای فیوز پیشنهادی به ترتیب برابر $1/9$ و $1/23$ محاسبه گردید.

مراجع

- [1] Craighead, G. (2009). Chapter 1 - High-Rise Building Definition, Development, and Use. in High-Rise Security and Fire Life Safety (Third Edition) Boston: Butterworth-Heinemann, pp. 1-26.
- [2] EERI. (1995). Northridge Earthquake Reconnaissance Report. Vol. 1. Earthquake Spectra, vol. supplement C to vol. 11.
- [3] Pall, A. S. and Marsh, C. (1982). Response Of Friction Damped Braced Frames. ASCE J Struct Div, Article vol. 108, no. ST6, pp. 1313-1323.
- [4] Grigorian, C. E., Yang, T. S., and Popov, E. P. (1993). Slotted Bolted Connection Energy Dissipators. Earthquake Spectra, vol. 9, no. 3, pp. 491-504.
- [5] Mualla, I. H. and Belev, B. (2002). Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation. Engineering Structures, vol. 24, no. 3, pp. 365-371.
- [6] Skinner, R. I., Kelly, J. M., and Heine, A. J. (1974). Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol. 3, no. 3, pp. 287-296.
- [7] Skinner, R. I., Tyler, R. G., Heine, A. J., and Robinson, W. H. (1980). Hysteretic dampers for the protection of structures from earthquakes. Bulletin of the New Zealand national society for earthquake engineering, vol. 13, no. 1, pp. 22-36.
- [8] TahamouliRoudsari, M., Eslamimanesh, M. B., Entezari, A. R., Noori, O., and Torkaman, M. (2018). Experimental Assessment of Retrofitting RC Moment Resisting Frames with ADAS and TADAS Yielding Dampers. Structures, vol. 14, pp. 75-87.
- [9] Mahmoudi Sahebi, M. and Khanjani, F. (2017). Evaluation of seismic performance of X bracing systems equipped with flexural yielding dampers. Structural and construction engineering, vol. 4, no. 2, pp. 123-138.
- [10] Bouwkamp, J., Vetr, M. G., and Ghamari, A. (2016). An analytical model for inelastic cyclic response of eccentrically braced frame with vertical shear link (V-EBF). Case Studies in Structural Engineering, vol. 6, pp. 31-44.
- [11] Zahrai, S. M. and Arman Nikoo, S. (2015). Comparing Seismic Performance of Yielding Damped Braced Frames with Mild and Low-Yield Steel in Typical Steel Buildings. (in eng). Modares Civil Engineering journal, vol. 14, no. 4, pp. 39-52.
- [12] Andalib, Z., Kafi, M. A., Kheyroddin, A., and Bazzaz, M. (2014). Experimental investigation of the ductility and performance of steel rings constructed from plates. Journal of Constructional Steel Research, vol. 103, pp. 77-88.
- [13] Kafi, M. A. (2008). Laboratory examination and analysis of the impact of steel ring in concentric braces. Ph. D., Civil engineering, IRAN University of science and technology, Tehran.
- [14] Andalib, Z., Kafi, M. A., Kheyroddin, A., Bazzaz, M., and Momenzadeh, S. (2018). Numerical evaluation of ductility and energy absorption of steel rings constructed from plates. Engineering Structures, vol. 169, pp. 94-106.
- [15] Bazzaz, M., Andalib, Z., Kafi, M. A., and Kheyroddin, A. (2015). Numerical Comparison of the Seismic Performance of Steel Rings in Off-centre Bracing System and Diagonal Bracing System. Steel and Composite Structures, vol. 19, pp. 917-937.
- [16] Bazzaz, M., Andalib, Z., Kafi, M. A., and Kheyroddin, A. (2015). Evaluating the Performance of OBS-C-O in Steel Frames under Monotonic Load. Earthquakes and Structures, vol. 8, pp. 697-710.
- [17] Bazzaz, M., Kheyroddin, A., Kafi, M. A., and Andalib, Z. (2012). Evaluation of the Seismic Performance of Off-Centre Bracing System with Ductile Element in Steel Frames. Steel and Composite Structures, vol. 12, pp. 445-464.
- [18] Yoshino, T. and Karino, Y. (1971). Experimental study on shear wall with braces: Part 2. Summaries of technical papers of annual meeting. (in Japanese). Architectural Institute of Japan, Structural Engineering Section, vol. 11, pp. 403-404.
- [19] Xie, Q. (2005). State of the art of buckling-restrained braces in Asia. Journal of Constructional Steel Research, vol. 61, no. 6, pp. 727-748.

- [20] Sabelli, R. (2001). Research on improving the design and analysis of earthquake-resistant steel braced frames. NEHRP, California.
- [21] López, W. A. and Sabelli, R. (2004). Seismic Design of Buckling-Restrained Braced Frames, Steel Tips. California.
- [22] Tremblay, R., Bolduc, P., Neville, R., and DeVall, R. (2006). Seismic testing and performance of buckling restrained bracing systems. Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 33, pp. 183-198.
- [23] Mazzolani, F. M. (2008). Innovative metal systems for seismic upgrading of RC structures. (in English). Journal of Constructional Steel Research, Article vol. 64, no. 7-8, pp. 882-895.
- [24] Mirtaheri, M., Gheidi, A., Zandi, A. P., Alanjari, P., and Samani, H. R. (2011). Experimental optimization studies on steel core lengths in buckling restrained braces. Journal of Constructional Steel Research, vol. 67, no. 8, pp. 1244-1253.
- [25] Hoveidae, N., Tremblay, R., Rafezy, B., and Davaran, A. (2015). Numerical investigation of seismic behavior of short-core all-steel buckling restrained braces. Journal of Constructional Steel Research, vol. 114, pp. 89-99.
- [26] Kachooee, A. and Kafi, M. A. (2018). A Suggested Method for Improving Post Buckling Behavior of Concentric Braces Based on Experimental and Numerical Studies. Structures, vol. 14, pp. 333-347.
- [27] Fanaie, N. and Dizaj, E. (2014). Response modification factor of the frames braced with reduced yielding segment BRB. Structural Engineering and Mechanics, vol. 50, no. 1.
- [28] Dizaj, E., Fanaie, N., and Zarifpour, A. (2017). Probabilistic seismic demand assessment of steel frames braced with reduced yielding segment buckling restrained braces. Advances in Structural Engineering, vol. 21, no. 7, pp. 1002-1020.
- [29] Mohammadi, M., Kafi, M. A., Kheyroddin, A., and Ronagh, H. R. (2018). Experimental Study Of Innovative Composite Buckling-Restrained Fuse For Concentrically Braced Frames Under Cyclic Load, presented at the ASEA SEC 04, Brisbane, Australia.
- [30] Mohammadi, M., Kafi, M. A., Kheyroddin, A., and Ronagh, H. R. (2018). Experimental And Numerical Investigation Of Innovative Composite Buckling-Restrained Fuse, presented at the ACM25, Brisbane, Australia.
- [31] Pandikkadavath, M. S. and Sahoo, D. R. (2016). Cyclic testing of short-length buckling-restrained braces with detachable casings. Earthquakes and Structures. vol. 10, pp. 699-716.
- [32] Sahoo, D. R. and Pandikkadavath, M. S. (2014). Experimental Study on Reduced-length Buckling-restrained Braces under Slow-cyclic Loading, presented at the Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska.
- [33] Bruneau, M., Uang, C. M., and Sabelli, R. (2011). Ductile Design of Steel Structures, 2nd Edition. McGraw-Hill Education.
- [34] Budynas, R. G., Nisbett, J. K., and Shigley, J. E. (2011). Shigley's mechanical engineering design. 9th Ed. New York: McGraw-Hill.
- [35] Usami, T., Wang, C., and Funayama, J. (2011). Low-Cycle Fatigue Tests of a Type of Buckling Restrained Braces. Procedia Engineering, vol. 14, pp. 956-964.
- [36] DIN 17100, Steels for general structural purposes-Quality Standard. (1980).
- [37] ASTM E8/E8M-16a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. (2016).
- [38] AISC341. (2016). ANSI/AISC 341-16, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. United States of America, Chicago: American Institute of Steel Construction.
- [39] ATC24. (1992). Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures. Redwood City, Calif.: Applied Technology Council.
- [40] Uriz, P. (2008). Toward earthquake-resistant design of concentrically braced steel-frame structures. Berkeley, Calif.: Pacific Earthquake Engineering Research Center.