

Performance Analysis of Steel-Composite Buckling-Restrained Brace

Mohsen Heidari¹, Bahram Navayinia^{2*}, Morteza Hossein Ali Beigi³

1- Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

Buckling-restrained braces (BRBs) are vital components in steel-braced frames. These diagonal braces act to dissipate energy and resist lateral earthquake loads. They typically consist of a slender steel core encased in concrete or steel to prevent buckling under compression. Engineered cementitious composites (ECC), also known as ECC concrete, have gained significant interest due to their numerous advantages over conventional concrete. This paper introduces a novel Steel-Composite Buckling-Restrained Brace (SC-BRB) that leverages the combined benefits of ECC and a steel casing. The proposed SC-BRB features a unique diamond-shaped composite core, an internal stiffener for added stability, and an outer buckling-restraining casing. To investigate its seismic performance, an extensive parametric study was conducted using the finite element method (FEM) in ABAQUS software. Different specimens were analyzed based on variations in the distance between the inner and outer casings, the thickness of the outer casing, and the use of normal concrete versus ECC. The results demonstrate that the proposed SC-BRB exhibits stable hysteretic behavior, indicating excellent energy dissipation and good ductility. Furthermore, the combination of the outer casing and ECC core significantly impacts the initial stiffness and ultimate strength. Compared to a conventional BRB, the SC-BRB exhibits an average increase of 20% in initial stiffness, 14% in ultimate tensile capacity, and a remarkable 54% improvement in ultimate compressive capacity. The outer casing also contributes to an 89% increase in ductility and a 31% improvement in equivalent viscous damping. The hysteresis responses revealed that under compressive loading, the SC-BRB initiates buckling, leading to contact between the core and the outer casing. This contact generates a frictional force that significantly enhances the compressive resistance. The near-identical shapes of the tensile and compressive portions of the hysteresis loop confirm the excellent buckling resistance performance of the SC-BRB.

ARTICLE INFO

Receive Date: 22 May 2024

Revise Date: 30 July 2024

Accept Date: 14 September 2024

Keywords:

Buckling-restrained brace,
Steel-composite core,
Engineered cementitious
composite (ECC), Hysteretic
behavior, Numerical study.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.458818.3421](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.458818.3421)

*Corresponding author: Bahram Navayinia

Email address: navayini@nit.ac.ir

تحلیل عملکرد مهاربند کمانش تاب فولادی و کامپوزیتی

محسن حیدری^۱، بهرام نوائی نیا^{۲*}، مرتضی حسینعلی بیگی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

مصالح ترکیبی در سازه‌های بلند به دلیل نیاز به اعضای مقاوم و مستهلک‌کننده انرژی اهمیت ویژه‌ای دارند. این مصالح می‌توانند با بهبود عملکرد لرزه‌ای و افزایش پایداری، مزایای قابل توجهی برای انواع مختلف سازه‌ها به ارمغان بیاورند. این مقاله یک مهاربند کمانش تاب نوآورانه را معرفی می‌کند که از مزایای ترکیب مصالح ECC^۱ و غلاف فولادی بهره می‌برد. این مهاربند شامل یک هسته کامپوزیتی لوزی‌شکل، سخت‌کننده داخلی، و جداره خارجی محدودکننده کمانش است. برای بررسی عملکرد لرزه‌ای این مهاربند پیشنهادی، یک مطالعه پارامتریک با استفاده از نرم‌افزار آباکوس صورت پذیرفت که شامل فاصله بین جداره داخلی و خارجی مهاربند، ضخامت جداره خارجی، و تاثیر بتن معمولی و بتن ECC می‌باشد. نتایج نشان داد که مهاربند پیشنهادی دارای رفتار هیستریزس پایدار با استهلاک انرژی بالا و شکل‌پذیری مناسب می‌باشد. علاوه بر این، استفاده از جداره خارجی و پرکردن هسته فولادی داخلی با بتن ECC، تاثیر قابل توجهی بر سختی اولیه و مقاومت نهایی دارد و به‌طور متوسط، مقدار سختی اولیه و ظرفیت‌های نهایی بار کششی و فشاری به ترتیب ۲۰، ۱۴، و ۵۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، استفاده از جداره خارجی شکل‌پذیری را تا ۸۹ درصد و میرایی ویسکوز معادل را تا ۳۱ درصد افزایش داده است. پاسخ‌های هیستریزس نشان داد که در حین بارگذاری فشاری، مهاربند پیشنهادی شروع به کمانش می‌کند و تماس بین هسته و جداره خارجی ایجاد می‌شود. نیروی اصطکاک حاصل از تماس، مقاومت بارگذاری در فشار را افزایش می‌دهد و باعث می‌شود بخش فشاری نمودار هیستریزس تقریباً هیچ تفاوتی با بخش کششی نداشته باشد. این عملکرد مناسب مهاربند پیشنهادی برای مقاومت در برابر کمانش را تایید می‌کند.

کلمات کلیدی: مهاربند کمانش تاب، هسته کامپوزیتی، سیمان کامپوزیتی مهندسی (ECC)، رفتار هیستریزس، مطالعه عددی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2024.458818.3421	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۳/۰۶/۲۴	۱۴۰۳/۰۶/۲۴	۱۴۰۳/۰۵/۰۹	۱۴۰۳/۰۳/۰۲
بهرام نوائی نیا navayi@nit.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

¹ Engineered cementitious composite

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر، طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها در مناطق زلزله‌خیز به طور فزاینده‌ای بر عملکرد و کنترل خسارت متمرکز شده است. این رویکرد در مقابل روش‌های سنتی طراحی لرزه‌ای که بر مقاومت در برابر فروپاشی تمرکز داشتند، قرار می‌گیرد. دستگاه‌های میراگر معمولاً به سه گروه غیرفعال، فعال و نیمه فعال طبقه بندی می‌شوند [۱]-[۳] که به دلایل اقتصادی میراگرهای غیرفعال رایج‌تر از سایر موارد هستند. مهاربندهای مقاوم در برابر کمانش^۲ (BRB) به عنوان نوعی رایج از میراگر غیرفعال، به طور گسترده در سازه‌ها برای کاهش پاسخ جابه‌جایی با افزایش مقاومت جانبی در حین جذب انرژی ارتعاشی استفاده شده‌اند [۴]. BRB معمولی از یک هسته فولادی و یک سیستم مهار کمانش تشکیل شده است که در آن کمانش هسته فولادی در فشار توسط مهار محدود می‌شود. بنابراین، BRB می‌تواند از تغییر شکل‌های پلاستیک محوری عضو هسته برای دستیابی به رفتار هیستریزس پایدار و تقریباً متقارن تحت کشش و فشار استفاده کند. بسیاری از محققان بر اساس این مفهوم طراحی، پیکربندی‌های مقطع عرضی مختلفی با شکل‌های صلیبی و صفحات فولادی پرمقاومت، صفحات فولادی با مقطع کاهش یافته و مهاربندهای دارای کابل و میله‌های پیش‌کشیده را برای BRBها پیشنهاد کرده‌اند [۵]-[۸]. این مطالعات رفتار هیستریزس پایدار با استهلاک انرژی قابل قبولی را گزارش کردند.

فوجی و تاگاوا [۹] و همچنین ماتئوس و همکاران [۱۰] نوعی BRB پیشنهاد نمودند که از یک هسته میله فولادی با انتهای پیچ‌های غلتکی تشکیل می‌گردد در واقع این نوع BRB از یک عضو مهار کمانش دوگانه استفاده می‌کند که از لوله‌های داخلی و خارجی تشکیل شده است. لوله داخلی به طور مستقیم کمانش میله هسته را محدود می‌کند، در حالی که لوله خارجی کمانش کلی BRB را محدود می‌کند. در مقایسه با دستگاه‌های میراگر کوتاه با یک لوله مهار تکی ترکیب عضو مهار کمانش دوگانه برای BRB با هسته‌های طویل به دلیل سختی خمشی بزرگ‌تر و وزن سبک‌تر مناسب‌تر است و نتایج لرزه‌ای خوبی را به همراه داشته است [۱۱]-[۱۳].

وانگ و همکاران در مطالعه‌ای بر مکانیزم مهار جزئی PBRB^۳ تمرکز کردند [۱۴]. در این مطالعه پارامتر نسبت عرض به ضخامت قسمت بدون مهار به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی تاثیرگذار بر رفتار PBRB مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که بیشترین کرنش پلاستیک و تنش تسلیم برای PBRB در ورق هسته بدون مهار متمرکز می‌شود و برای اطمینان از اینکه رفتار PBRB با رفتار BRB معمولی قابل مقایسه باشد، توصیه شد که نسبت عرض بدون مهار کمتر از ۵ باشد. شی و همکاران [۱۵] در مطالعه تجربی و عددی عملکرد لرزه‌ای مهاربند تمام فولادی مونتاژ شده با نقطه تسلیم پایین (LYBRB)^۴ را بررسی کردند. تفاوت LYBRB با BRB سنتی این است که در LYBRB از فولاد Q195 با نقطه تسلیم پایین با مقطع عرضی هم‌راستا، که می‌تواند انرژی لرزه‌ای را بهتر جذب کند، برای ماده هسته استفاده می‌شود. نتایج کار شی و همکاران نشان داد که استفاده از مهاربند با فولاد دارای نقطه تسلیم پایین سبب می‌گردد تا منحنی هیستریزس دارای تقارن، پایداری و پرشوندگی خوبی گردیده و ظرفیت اتلاف انرژی آن بهتر گردد. ژانگ و همکاران [۱۶]، مهاربند مقاوم در کمانش با هسته‌های میله فولادی و دارای لوله بیرونی SHS^۵ را بررسی کردند و نشان دادند که BRB پیشنهادی می‌تواند یک پاسخ هیستریزس پایدار و اتلاف انرژی رضایت‌بخش را به دنبال داشته باشد. حداد و شریو [۱۷] به بررسی رفتار چرخه‌ای غیرالاستیک مهاربندهای مقطع بال پهن فولادی بزرگ مقیاس پرداختند و نشان دادند افزایش یا کاهش مقاومت و ضخامت صفحات اتصال با مقدار ۱۰٪ یا ۲۰٪ تا اثر ناچیزی بر رفتار هیستریزس و حالت شکست نمونه‌ها دارد.

ژانگ و همکاران [۱۸] با هدف مقاوم‌سازی لرزه‌ای در پژوهشی مهاربند مقاوم در کمانش با هسته دوگانه T شکل را مورد مطالعه تجربی، تحلیل عددی قرار دادند. نتایج کار ایشان نشان داد که استفاده از طرح مقاوم‌سازی تاثیر ناچیزی بر سختی الاستیک اعضای T شکل فولادی دارد، اما ظرفیت نیروی فشاری محوری آنها را تا ۶۰٪ افزایش می‌دهد. یون و همکاران [۱۹] در بررسی تجربی و عددی مهاربند مقاوم در کمانش از هسته سوراخ‌دار استفاده کردند. نتایج مقایسه‌ای بین مهاربند دارای هسته صفحه سوراخ‌دار و بدون سوراخ نشان داد که

^۲ Buckling restrained brace

^۳ Partially buckling-restrained brace

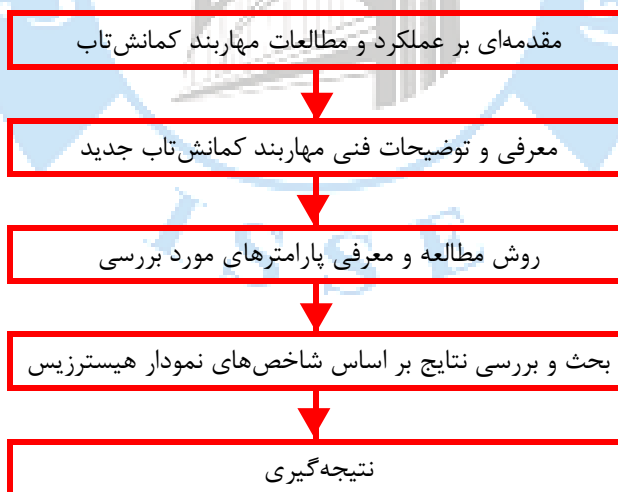
^۴ Low yeild buckling-restrained brace

^۵ Square hollow section

هسته صفحه‌ای سوراخ‌دار، شکل‌پذیری، خواص خستگی و ظرفیت اتلاف انرژی جمعی بهتری را نشان می‌دهد. لیو و همکاران [۲۰] در مطالعه تجربی و عددی، رفتار هیستریزس مهاربند ترکیبی مقاوم در کمناش با جداره چوبی و هسته فولادی صلیبی را بررسی کردند. نتایج رفتار لرزه‌ای این نوع مهاربند کامپوزیتی، عملکرد هیستریزس پایدار با ظرفیت اتلاف انرژی ایده‌آل را نشان داد. ژانگ و همکاران [۲۱] در مطالعه تجربی و عددی به بررسی مهاربند جدید مقاوم در کمناش با هسته سوراخ‌دار آیوکسیتیک^۶ پرداختند. مواد آیوکسیتیک می‌توانند به دلیل ویژگی‌های تغییر شکل منحصر به فرد خود، خواص مکانیکی مطلوبی مانند مقاومت در برابر شکست، مقاومت برشی و اتلاف انرژی را نشان دهند. نتایج مطالعات بر روی این مهاربند نشان داد که منحنی‌های هیستریزس رفتار پایدار و ظرفیت اتلاف انرژی خوبی دارند.

ژانگ و همکاران [۲۲] در مطالعه‌ای به تحلیل شبیه‌سازی عددی مهاربند مقاوم در کمناش با دو نقطه تسلیم با هسته داخلی قابل تعویض پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مهاربند دو مرحله‌ای مقاوم در کمناش، رفتار دو مرحله‌ای مناسب و عملکرد هیستریزس پایدار و متقارن دارد. تمام اجزای محیطی پس از بارگذاری اساساً در حالت الاستیک نگه داشته می‌شوند، که نشان می‌دهد پس از زلزله مهاربند قابلیت تعمیر خوبی دارد. یانگ و همکاران [۲۳] با توسعه مهاربند مقاوم در کمناش، از ایده تسلیم دو مرحله‌ای موازی استفاده کرد. این ایده شامل سیستم هسته موازی، سیستم انتقال بار و سیستم مهار است. هسته‌های مرحله اول و دوم به صورت موازی قرار گرفته و به صورت غیرهم‌زمان فعال می‌شوند. نتایج این پژوهش نشان داد که مکانیزم کار دو مرحله‌ای ظرفیت اتلاف انرژی خوبی را به همراه دارد.

در پژوهش حاضر یک مهاربند کمناش‌تاب جدید با هسته‌های متعدد از لوله‌های فولادی تو در تو با هسته کامپوزیتی ارائه می‌گردد. اجزای مهاربند کمناش‌تاب شامل یک لوله مربعی شکل توخالی (SHS) بیرونی و یک لوله داخلی مربعی شکل تقویت شده در دو حالت تو خالی و پر شده با بتن‌های معمولی و ECC به طور مجزا است. یکی از مزیت‌های مهم این مطالعه نسبت به مطالعات گذشته، استفاده از پیکربندی دوگانه با هسته کامپوزیتی برای افزایش کارایی مهاربند است. در این مقاله، ابتدا پیکربندی مهاربند پیشنهادی ارائه شده، سپس مطالعه پارامتریک گسترده صورت گرفته برای نمونه‌های عددی تحت بارگذاری چرخه‌ای ارائه و نتایج به طور کامل و دقیق مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد که در یک دیدگاه کلی فلوچارت روند این مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: چارت روند مطالعاتی مهاربند کنترل‌کننده کمناش پیشنهادی.

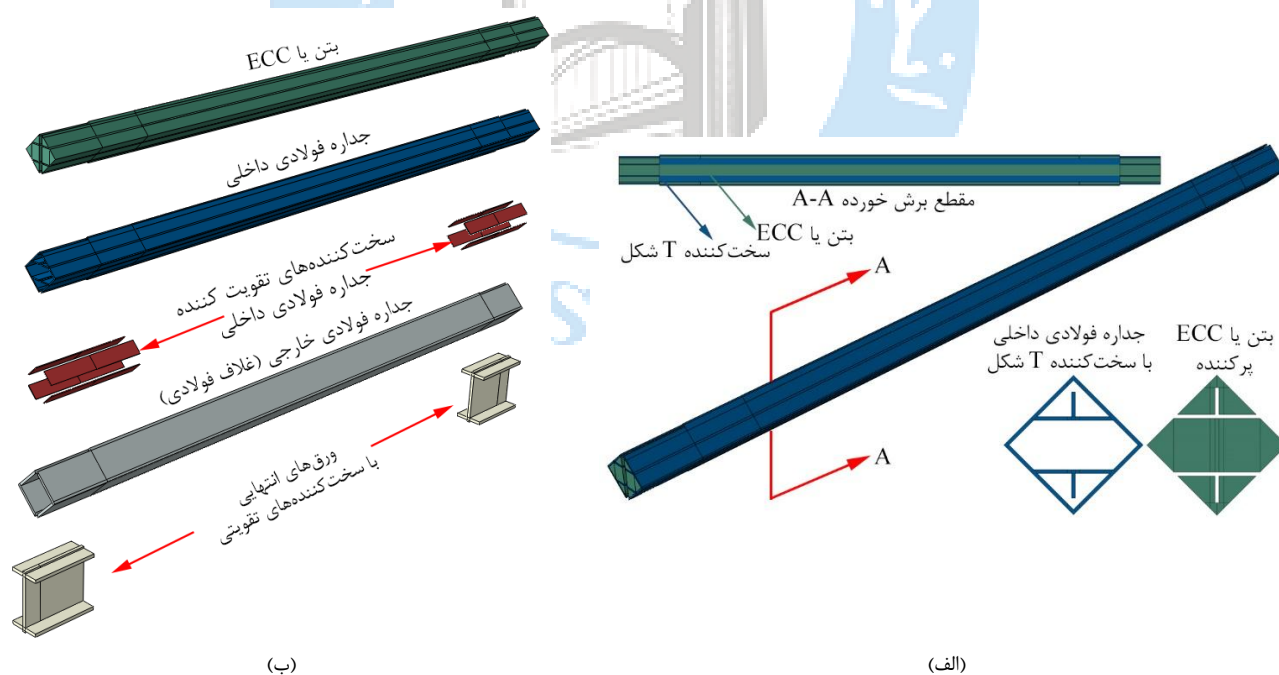
۲- پیکربندی مهاربند کمناش‌تاب پیشنهادی

این مطالعه پیکربندی نوآورانه یک مهاربند کمناش‌تاب لرزه‌ای با هسته‌های فولادی و کامپوزیتی را ارائه می‌دهد، که هندسه آن در شکل ۲ نشان داده شده است. هسته کمناش‌تاب پیشنهادی یک لوله مربعی فولادی که در آن دو سخت‌کننده T شکل در وسط داخلی

⁶ Auxetic

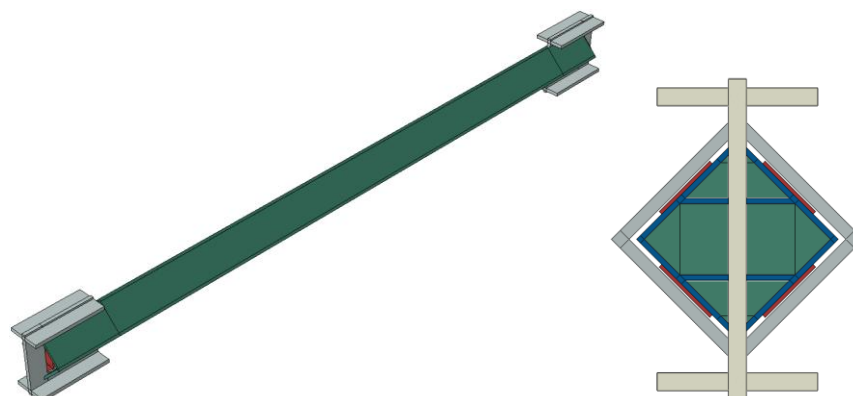
اضلاع مقطع مربعی جوش داده شده است. موقعیت قرارگیری هسته در مهاربند کمانش تاب بصورت لوزی است تا حداکثر ممان اینرسی و شعاع ژیراسیون حاصل گردد و سختی خمشی آن نسبت به حالت مربعی بیشتر گردد. در قسمت خارجی بادبند از یک لوله مربعی فولادی بزرگتر استفاده می‌شود که بصورت هم‌مرکز در اطراف هسته مهاربند قرار می‌گیرد. بر روی این جداره خارجی و در دو انتهای آن دو شکاف ایجاد شده است که شکاف یک سر آن کوچکتر و به ورق انتهایی مهاربند تکیه داده می‌شود و شکاف سر دیگر آن بزرگتر ایجاد می‌گردد تا زمانی که بار چرخه‌ای محوری اعمال می‌گردد، ورق انتهایی به جداره خارجی برخورد نکند و درون شکاف بزرگ‌تر، لغزش آزادانه داشته باشد و بار محوری را مستقیم به هسته مهاربند منتقل کند. در قسمت ابتدا و انتهایی هسته مهاربند از دو ورق انتهایی تقویت شده جهت اعمال بارگذاری استفاده شده است. در اطراف محل اتصال ورق انتهایی به هسته مهاربند، برای جلوگیری از تمرکز تنش و شکست موضعی از چهار ورق تقویت کننده در دو سمت ابتدایی و انتهایی هسته مهاربند استفاده گردید. لوله بیرونی برای بهبود سختی خمشی و کنترل کمانش استفاده می‌شود.

مکانیزم عملکردی این مهاربند پیشنهادی مبتنی بر استفاده از یک شکاف هوا بین هسته کامپوزیتی و جداره خارجی می‌باشد که از تماس مستقیم هسته کامپوزیتی و جداره خارجی جلوگیری و اصطکاک بین آنها را اگر کاملاً حذف ننماید به‌طور قابل توجهی کم می‌نماید. با این حال، در حین بارگذاری فشاری، هسته کامپوزیتی مهاربند ممکن است به اندازه ای کمانش کند که هسته و جداره خارجی با یکدیگر تماس پیدا کنند. نیروی اصطکاک حاصل از تماس، مقاومت بارگذاری در فشار را افزایش می‌دهد. این افزایش مقاومت را می‌توان به دو عامل، مقاومت هسته کامپوزیتی در برابر کمانش و نیروی اصطکاک بین هسته و جداره خارجی نسبت داد که اولی منجر به افزایش ظرفیت کمانشی هسته کامپوزیتی و عامل دوم نیز سبب جذب انرژی زیادی گردیده و از تخریب سازه جلوگیری می‌کند. تحلیل‌ها نشان می‌دهد مشابهت بخش‌های فشاری و کششی منحنی هیستریزس مهاربند پیشنهادی، عملکرد مطلوب آن در برابر کمانش را اثبات می‌کند. در واقع، مهاربند پیشنهادی می‌تواند در برابر بارهای فشاری و کششی تقریباً یکسان مقاومت کند. این ویژگی، مهاربند پیشنهادی را به یک گزینه مناسب برای سازه‌های در معرض بارهای جانبی، مانند زلزله، تبدیل می‌کند.



(ب)

(ف)

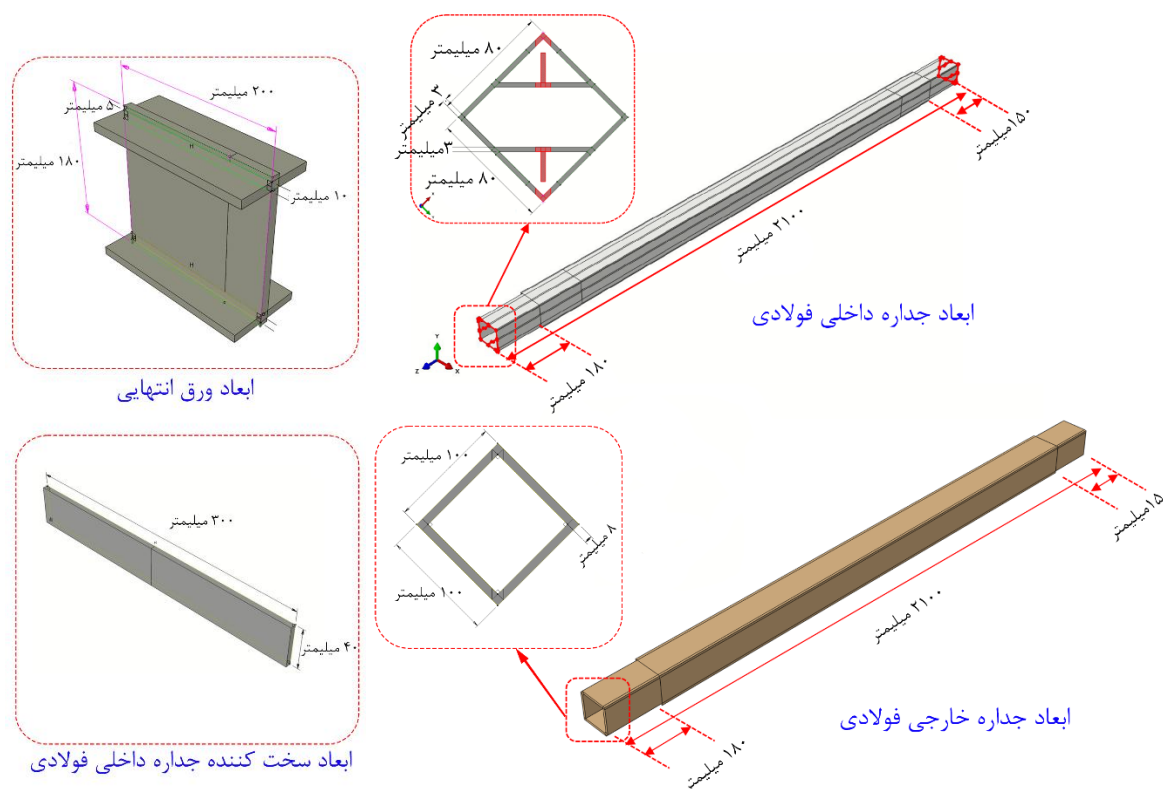


(ج)

شکل ۲: مهاربند کنترل کننده کمانش پیشنهادی، (الف) نحوه قرارگیری جداره فولادی داخلی و مصالح پرکننده در هسته کامپوزیتی، (ب) اجزای مهاربند کمانش تاب پیشنهادی، (ج) نحوه قرارگیری هسته کامپوزیتی در درون جداره فولادی خارجی (با غلاف فولادی).

۳- روش انجام پژوهش

در این مطالعه، از برنامه اجزای محدود آباکوس [۲۴] برای تحلیل عملکرد لرزه‌ای مهاربند پیشنهادی کمانش تاب فولادی و کامپوزیتی استفاده شد. ابعاد و پیکربندی‌های همه مدل‌های عددی بر اساس پارامترهای مورد مطالعه متغیر بود که جزئیات آن در بخش مدل‌های مورد مطالعه مهاربند کمانش تاب آورده شده است. مطابق شکل ۳، طول بادبند مورد بررسی ۲/۱ متر، ابعاد ورق سخت کننده که در ابتدا و انتهای هسته داخلی جوش داده شده است به طول ۳۰۰ و عرض ۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر و ابعاد مربوط به ورق انتهایی (گاست پلیت) با طول و عرض ورق ۲۰۰ میلی‌متر و دو سخت کننده در بالا و پایین به ابعاد ۱۰۰ در ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مقطع داخلی هسته فولادی بادبند ۸۰ در ۸۰ میلی‌متر و ضخامت آن ۳ میلی‌متر، جداره خارجی بادبند مورد بررسی ۱۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر با ضخامت متغیر در نظر گرفته شده است.



شکل ۳: ابعاد اعضای تشکیل دهنده مهاربند کمانش تاب پیشنهادی.

مدول یانگ (E_s) معادل ۲۰۰ گیگا پاسکال و تنش تسلیم (F_y) و مقاومت کشش نهایی (F_u) بر مبنای فولاد رایج st37 در نظر گرفته شده که مقادیر آن به ترتیب ۲۴۰ و ۳۷۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. برای اجزای فولادی، از مدل سینماتیکی دوخطی با سخت‌شوندگی چرخه‌ای ارائه شده توسط چابوچه [۱۶ و ۲۵] استفاده شده است که در شکل ۴ (الف) نشان داده شده است. بر اساس مقاله ژانگ و همکاران [۱۶]، نقطه ناپیوسته یا نقطه شکستگی نمودار تنش-کرنش؛ به عنوان نقطه تسلیم (F_y) تعریف شده است. مقدار مدول الاستیک (E) در مرحله الاستیک برابر شیب ناحیه خطی منحنی تنش-کرنش و در مرحله پلاستیک به عنوان مدول پس از تسلیم (E_t) برابر ۱٪ مدول الاستیک [۱۶ و ۲۵] در ناحیه خطی مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شد. به این ترتیب و مطابق آنچه بیان گردید رابطه تنش-کرنش را می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان کرد:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_t} & \sigma \leq F_y \\ \frac{F_y}{E_t} + \frac{\sigma - F_y}{E_t} & \sigma > F_y \end{cases} \quad (1)$$

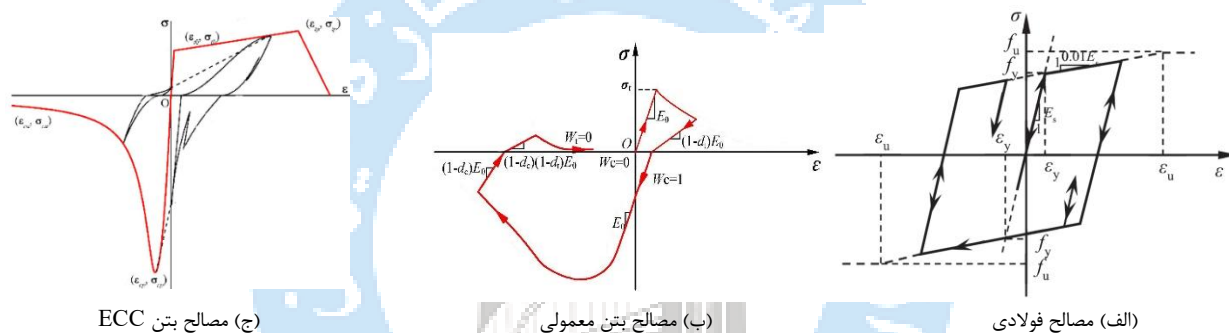
به منظور مدل‌سازی بتن از مدل پلاستیک آسیب بتن برای شبیه‌سازی خواص مکانیکی بتن معمولی و بتن ECC در بتن پر کننده هسته فولادی مهاربند کمانش تاب استفاده شد. با توجه به سطوح مختلف محصورشدگی و رفتار مختلف مصالح بتن معمولی و بتن ECC در کشش و فشار، در این مطالعه از روابط تنش-کرنش ارائه شده در مطالعات هان و همکاران [۲۶] برای بتن محصورشده و از روابط ارائه شده توسط لی و همکاران [۲۷ و ۲۸] برای مصالح بتن معمولی و بتن ECC استفاده شد. منحنی تنش-کرنش بتن معمولی و بتن ECC در شکل ۴ (ب و الف) نشان داده شده است. شاخص‌های آسیب کششی و فشاری به صورت فرمول (۲) تعیین شدند:

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t + n_t \sigma_{t0}}{E_0 (n_t \sigma_{t0} / E_0 + \varepsilon_t)} \quad (2)$$

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c + n_c \sigma_{c0}}{E_0 (n_c \sigma_{c0} / E_0 + \varepsilon_c)}$$

که در آن σ_{t0} و σ_{c0} به ترتیب تنش بیشینه کششی و فشاری، d_t و d_c به ترتیب شاخص‌های آسیب کششی و فشاری بوده و بین ۰ تا ۱ هستند؛ n_t و n_c پارامترهای کنترلی محسوب می‌شوند که برای بتن معمولی و بتن ECC محصور شده با لوله فولادی، $n_t = 1$ و $n_c = 2$ در نظر گرفته شدند [۲۹]. بازیابی سختی بارگذاری مجدد که در شکل ۴ (الف) نشان داده شده است، توسط ضرایب سختی ω_t و ω_c نشان داده می‌شود، که برای بتن در حالت کشش و $\omega_t = 1$ و برای بتن با سه محوره محصور شده در حالت فشاری می‌باشد.

مطابق با ACI 318-19 [۳۰] مدول الاستیک بتن از رابطه $E_0 = 4730 \cdot (f_c)^{0.5}$ تعیین می‌گردد که در آن f_c مقاومت نمونه استوانه‌ای بتنی است. پارامترهای پلاستیسیته بتن معمول و بتن ECC برای زاویه اتساع به ترتیب ۳۲ و ۳۰ درجه و برای پارامترهای برون مرکزی پتانسیل جریان، نسبت مقاومت فشاری دو محوره به مقاومت فشاری تک محوره، نسبت دومین تغییر ناپذیر تانسور تنش در صفحه نصف النهار کششی به صفحه نصف النهار فشاری و ضریب چسبندگی هر دو بتن به ترتیب ۰/۱، ۱/۱۶، ۰/۶۶۷ و ۰/۰۰۰۱ در نظر گرفته شدند [۲۸ و ۳۱].



شکل ۴: نمودار تنش- کرنش مصالح فولادی، بتن معمولی و بتن ECC.

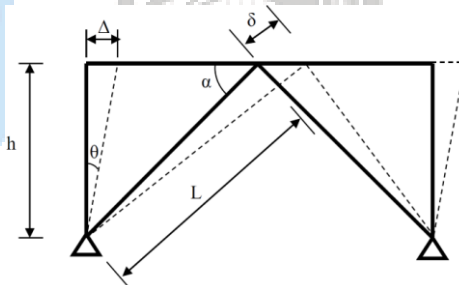
برای شبیه‌سازی رفتار نرمال و تماسی بین هسته فولادی BRB و بتن معمولی یا بتن ECC پرکننده، از تماس سخت و ضریب اصطکاک مماسی کولمب با مقدار ۰/۳ استفاده شد. کار شبیه‌سازی روی BRB با استفاده از لوله فولادی پر از بتن به عنوان مهارکننده توسط وانگ و همکاران [۳۵] انجام شد و با استفاده از ضریب اصطکاک مماسی کولمب، مطابقت خوبی بین نتایج عددی و آزمایشی به دست آمد. در عین حال، تماس بین هسته لوله فولادی و جداره خارجی فولادی نیز به عنوان تماس سخت فرض شد و ضرایب اصطکاک کولمب بین اجزای لوله فولادی ۰/۵ تعیین شدند [۳۲-۳۴]. اتصالات صفحات فولادی در موقعیت‌هایی که نیاز به جوش داشت کاملاً مقید تعریف می‌گردد تا عملکرد لغزشی بین دو سطح را کاملاً وابسته و مشابه جوش نماید.

با توجه به اینکه در اعضای محوری نقص اولیه که در اثر ساخت در اعضا وجود دارد یکی از پارامترهای مهم در شبیه‌سازی است، در این مطالعه نیز بر اساس اعتبارسنجی مدل عددی و آزمایشگاهی مقدار نقص اولیه در مدل‌ها اعمال گردید. مقدار نقص اولیه از تحلیل کماتشی، در راستای مود اول کماتش مهاربند و بر اساس مقدار ویژه اعمال شد. بزرگی نقص هندسی اعمال شده مطابق مرجع [۳۴] به مقدار $L/1000$ در نظر گرفته شد که در آن L طول مهاربند است.

تکیه‌گاه مفصلی به گونه‌ای تعریف شده که تمام درجات آزادی تکیه‌گاهی به جز دو مورد، یعنی دوران حول محور عمود بر مهاربند BRB و جابه‌جایی در امتداد محور اصلی مهاربند، بسته شده است. پروتکل بارگذاری مورد استفاده در این مطالعه بصورت رفت و برگشتی و بر اساس استاندارد AISC Seismic Provisions [36] مطابق شکل ۵ اعمال شده است. در شکل ۵، پارامتر Δ مقدار جابه‌جایی در

هر لحظه از بارگذاری را نشان می‌دهد، اگر این جابجایی مربوط به طبقه بام باشد با Δ_b ، اگر میزان جابجایی بام باعث تسلیم‌شدگی اعضای سازه گردد با عبارت Δ_{by} و اگر جابجایی بام به مقدار جابجایی طراحی برسد با عبارت Δ_{bm} نشان داده می‌شود. استاندارد AISC، پروتکل بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیک را برای نمونه‌های تست مهاربندی BRB بر اساس کمیت‌های تغییر شکل مربوط به تسلیم اولیه (Δ_{by}) و تغییر شکل مربوط به طراحی (Δ_{bm}) تعریف می‌کند. پروتکل بارگذاری AISC دو چرخه در سطوح تغییر شکل Δ_{by} ، $0.5\Delta_{bm}$ ، Δ_{bm} ، $1.5\Delta_{bm}$ و $2\Delta_{bm}$ پیشنهاد می‌کند. باید توجه داشت که طبق پروتکل تست نمونه مهاربندی AISC، جابجایی نسبی طبقه طراحی نمی‌تواند کمتر از $0.1/0.1$ برابر ارتفاع طبقه باشد. در این مطالعه، جابجایی نسبی طبقه طراحی برای همه نمونه‌ها $3/3$ ارتفاع طبقه با مقدار $2/8$ متر در نظر گرفته شد. در این روش، جابجایی‌های محوری مهاربندها که در اثر بارگذاری جانبی به وجود می‌آیند، به جابجایی نسبی طبقه (زاویه جابجایی نسبی بین طبقات = θ) تبدیل می‌شوند. برای انجام این کار، فرض می‌شود که مهاربندها با زاویه 45 درجه نسبت به خط مرکزی تیر قرار گرفته‌اند. فرمول (۳) بر اساس رابطه سینماتیکی هندسی بر اساس شکل ۵ به دست آمده است. برای اعمال بار چرخه‌ای جانبی در قسمت فوقانی مهاربند BRB، بارمحوری چرخه‌ای بصورت جابه‌جایی به نقطه مرجع، نقطه‌ای که با 6 درجه آزادی که در نرم‌افزار تعریف می‌گردد تا روند اعمال بارگذاری ساده‌سازی و روی ورق فولادی انتهای مهاربند اعمال شود. در ادامه بر اساس حساسیت‌سنجی انجام شده برای تعیین ابعاد اجزا در شبکه اجزا محدود، در مهاربند BRB برای بتن معمولی و بتن ECC شبکه‌ها به شکل مربعی و اندازه شبکه‌ها 30 میلی‌متر و برای لوله فولادی و صفحه اتصال دهنده 20 میلی‌متر انتخاب شده که کلیات آن در شکل ۶ نشان داده شده است. در مناطق با تغییر هندسه یا اتصالات و یا بارگذاری یا تکیه‌گاه‌ها به منظور افزایش دقت مدل ابعاد اجزا در شبکه کوچکتر در نظر گرفته می‌شود. برای مدل نمودن مهاربند BRB برای المان بتن معمولی، بتن ECC، لوله فولادی، صفحه سخت‌کننده فولادی و لوله خارجی از اجزا 8 سالیید گرهی 12 ضلعی با اسم اختصاری C3D8R استفاده شده است که در آن هر گره دارای 3 درجه آزادی می‌باشد. با توجه به موارد مطروحه در خصوص شبکه اجزا محدود تعداد کل اجزا برابر 40240 حاصل گردیده است که مجموعاً شامل 62334 گره و 3 درجه آزادی برای هر گره می‌باشد.

$$\theta = \frac{\Delta}{h} = \frac{\delta/\cos\alpha}{L_b/\sin\alpha} \quad (3)$$



شکل ۵: نمای سینماتیکی بین زاویه جابجایی نسبی طبقه و جابجایی محوری مهاربند.

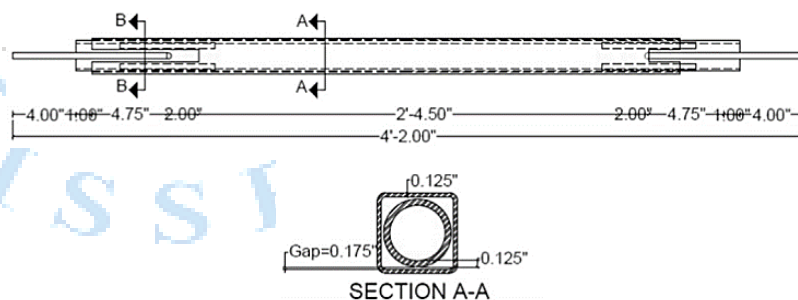


شکل ۶: شبکه‌بندی اعضای مهاربند کمانش تاب مورد استفاده در این پژوهش.

۴- اعتبارسنجی نمونه عددی

برای کنترل و صحت مدل عددی مهاربند مقاوم در برابر کمانش تحت بار چرخه‌ای، لازم است نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شود. این کار به منظور اطمینان از اینکه مدل تحلیلی رفتار واقعی سازه را به درستی شبیه‌سازی می‌کند، انجام می‌شود. بدین منظور نتایج حاصل از تحقیق حاضر به روش اجزا محدود با نتایج آزمایشگاهی شن و همکاران [۳۷] که در سال ۲۰۱۶ ارائه شده، مقایسه می‌گردد. در مطالعه شن و همکاران، مجموعه‌ای از نمونه‌های مهاربند فولادی از نوع دو لوله فولادی تو در تو^۷ با پارامترهای طراحی مختلف در آزمایشگاه سازه دانشگاه ایالتی آیووا برای بررسی رفتار هیستریزس تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. در این مطالعه از نمونه آزمایشگاهی با نام TinT # 1 استفاده شد. این نمونه آزمایشگاهی، دارای دامنه شکاف نسبتاً بزرگ در لوله فولادی خارجی و سختی کنترل کننده در کمانش است که جزئیات آن در شکل ۷ نشان داده شده است. بادبند فولادی کنترل کننده کمانش دارای دو جداره فولادی هم‌مرکز ارائه شده توسط شن و همکاران دارای طول کل بادبند ۱۲۶۷ میلی‌متر و مقطع جداره فولادی داخلی $84/3 \times 3/2$ O به طول $1066/8$ میلی‌متر و مقطع جداره فولادی خارجی $63/5 \times 3/2$ به طول $1066/8$ میلی‌متر است. اعضای اصلی بادبند شامل جداره‌های فولادی داخلی و خارجی از جنس فولاد ASTM-500 بوده و برای مدلسازی جوش در قسمت‌های دارای اتصال پیوسته از قید Tie استفاده شد.

مقایسه نمودار هیستریزس مدل آزمایشگاهی بادبند TinT # 1 حاصل از نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی حاصل از تحقیق حاضر در شکل ۸ نمایش داده شده است. همان‌طوریکه در شکل ۸ مشاهده می‌شود دو منحنی به طور کامل بر هم انطباق نداشته و مقدار اختلاف شاخص انرژی ۵ درصد و مقاومت نهایی ۴ درصد و میانگین آن‌ها $4/5$ درصد حاصل شد. با توجه به رفتاری که نمونه شبیه‌سازی از خودش نشان داده و رفتار نمونه در آزمایشگاه، می‌توان این اختلاف را به اعمالی که روی قطعات در آزمایشگاه انجام می‌دهند (از قبیل سوراخکاری، جوشکاری، خروج از مرکزیت، نقص اعضا و موارد مشابه)، نسبت داد. در ادامه در جدول ۱ میزان اختلاف نسبی بین مدل آزمایشگاهی و عددی مقایسه شده است که صحت پاسخ‌های حاصل از آباکوس در پژوهش انجام شده و دقت این نرم‌افزار در مدل‌سازی را بیان می‌کند.

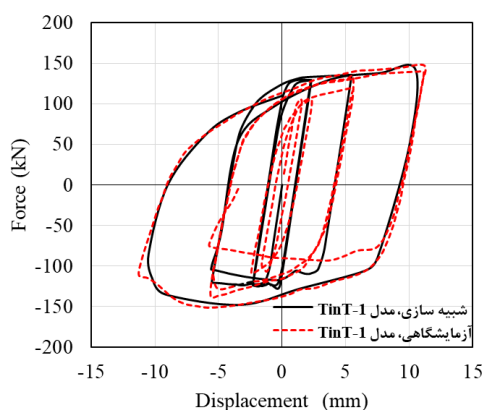


شکل ۷: نحوه آزمایش و اندازه بادبند مورد بررسی در مطالعه آزمایشگاهی پژوهش شن و همکاران [۳۷].

جدول ۱: مقدار اختلاف نسبی بین نمونه عددی و نمونه آزمایشگاهی شن و همکاران [۳۷].

شاخص‌های نمودار هیستریزس	انرژی (kN.mm)	مقاومت نهایی (kN)
نتایج نمونه آزمایشگاهی شن و همکاران	11082.91	147.42
نتایج نمونه شبیه‌سازی شده در آباکوس	11608.33	142.00
نسبت شاخص‌ها	1.05	0.96

⁷ Tube-in-Tube



شکل ۸: منحنی هیستریزیس نمونه‌های آزمایشگاهی شن و همکاران [۳۷] و شبهه‌سازی عددی تحقیق حاضر.

۵- بررسی شاخص‌های سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و میرایی مدل‌های مورد مطالعه

مقادیر و جزئیات هر پارامتر و شاخص‌های مورد بررسی برای هر پارامتر، در شکل ۸ آورده شده است. در مجموع این مطالعه ۱۵ مدل عددی را مورد تحلیل پارامتری قرار داده است. شکل‌های ۱۰ الی ۱۳ منحنی‌های هیستریزیس بار-جاب‌جایی را نشان می‌دهد که برای پارامترهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفتند. منحنی‌های هیستریزیس قبل از رسیدن جاب‌جایی افقی به ۰/۵ درصد تقریباً خطی بودند، که نشان می‌دهد نمونه‌ها اساساً در مرحله الاستیک قرار داشتند. پس از اینکه جاب‌جایی افقی از حدود ۵ میلی‌متر فراتر رفت، ظرفیت باربری با افزایش جاب‌جایی به آرامی افزایش یافت زیرا نمونه‌ها شروع به ورود به مرحله پلاستیک کردند. سختی اولیه جانبی (K_i) و ظرفیت باربری نهایی در کشش P_{mt} و فشار P_{mc} ، میرایی ویسکوز معادل و شکل‌پذیری نمونه‌ها از منحنی‌های هیستریزیس و پوش‌اور به دست آمد و با هم مقایسه شدند. لازم به ذکر است که سختی اولیه جانبی (K_i) با برآزش خطی مطابق با بخش اولیه منحنی‌های پوش‌اور تعیین شد.

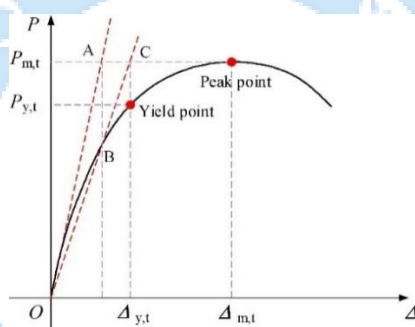


شکل ۹: چارت مورد استفاده برای مطالعه پارامتریک و هندسه مقطع مهابند مقاوم در برابر کماتش.

تعیین نقاط تسلیم و بیشینه برای تمام نمونه‌ها براساس منحنی‌های پوش‌اور انجام گرفته است. با توجه به غیرخطی بودن و عدم وجود نقطه تسلیم مشخص روی منحنی‌های پوش‌اور، نقطه تسلیم سازه مطابق شکل ۱۰ تعیین شد [۳۸]. ابتدا نقطه A برخورد دو خط به دست آمد که یکی از مماس در مبدا مختصات و دیگری خط افقی از نقطه اوج امتداد می‌یابند. سپس نقطه B تقاطع منحنی پوش‌اور و خط عمودی از نقطه A مشخص شد. در ادامه نقطه C بر اساس خط مورب از مبدأ و نقطه B و خط افقی از نقطه اوج تعیین شد. در نهایت،

نقطه تسلیم با امتداد خط عمودی از نقطه C تا منحنی اسکلت به دست آمد. جداول ۲ و ۳ نقاط مشخصه تمام نمونه‌ها را فهرست می‌کند که در آن $\Delta_{y,t}$ و $P_{y,t}$ به ترتیب بار تسلیم و تغییر شکل تسلیم و $\Delta_{m,t}$ و $P_{m,t}$ به ترتیب بار اوج و تغییر شکل اشاره دارند.

جدول ۲ و ۳ مقدار سختی و مقاومت مهاربند پیشنهادی در حالت توخالی، پر شده با بتن معمول و بتن ECC را نشان داده است. بیشترین ظرفیت‌های نهایی تحمل بار در کشش در نمونه‌هایی که مقطع فولادی اصلی، خالی از بتن و بدون جداره خارجی است، ۴۲۴/۳۳ کیلونیوتن و در حالتی که با بتن معمولی و بتن ECC پر شده است، ۴۶۳/۱۳ کیلونیوتن و ۵۰۴/۶۸ کیلونیوتن حاصل شده است. بیشترین ظرفیت‌های نهایی تحمل بار در فشار در نمونه‌های با مقطع فولادی اصلی، خالی از بتن و بدون جداره خارجی ۳۲۸/۲۳ کیلونیوتن و در حالتی که با بتن معمولی و بتن ECC پر شده است، ۵۱۱/۶۸ کیلونیوتن و ۵۴۱/۴۴ کیلونیوتن حاصل شده است. تحت بار محوری چرخه‌ای، ظرفیت‌های نهایی تحمل بار نمونه‌ها ۱/۲۴ تا ۱/۵۶ برابر ظرفیت‌های تسلیم آن‌ها حاصل شده، در حالی که تغییر شکل‌های نهایی این نمونه‌ها ۲/۰۳ تا ۵/۹۳ برابر تغییر شکل‌های تسلیم آن‌ها می‌باشد. تحت بار محوری منفی، ظرفیت‌های نهایی تحمل بار در نمونه‌هایی که فاقد جداره خارجی است به دلیل کمانش زودرس در فشار، بین ۱/۰۵ تا ۱/۱۱ برابر ظرفیت‌های تحمل بار تسلیم آن‌ها است، در حالی که با اضافه شدن جداره خارجی و پر کردن هسته فولادی مهاربند با بتن معمولی یا بتن ECC، ظرفیت‌های نهایی تحمل بار ۱/۳۱ تا ۱/۶۲ برابر تغییر شکل‌های تسلیم آن‌ها است. این مقادیر نشان می‌دهد که هر نمونه که دارای جداره فولادی خارجی است، در تغییر شکل پلاستیک عملکرد مناسب و مشابه رفتار کششی داشته است. در عین حال، مقاومت هر نمونه که دارای جداره فولادی خارجی است، تحت بارهای مثبت و منفی اساساً متقارن بود که عمدتاً به عملکرد مکانیکی محوری پایدار BRB در کشش و فشار مربوط می‌شود.



شکل ۱۰: موقعیت نقاط کلیدی در منحنی پوش اور.

جدول ۲: مقدار سختی و مقاومت مهاربند پیشنهادی در حالت توخالی [۳۸].

مدل عددی (مهاربند توخالی)	مقاومت نهایی در کشش	مقاومت نهایی در فشار	سختی اولیه
SB-U-w/o-0-3	424.33	-328.23	101.61
SB-U-O4-3-3	463.22	-429.15	102.36
SB-U-O8-3-3	463.22	-429.15	104.75
SB-U-O8-6-3	423.84	-437.93	104.12
SB-U-O8-9-3	366.89	-379.09	103.96

جدول ۳: مقدار سختی و مقاومت مهاربند پیشنهادی در حالت پر شده با بتن معمول و بتن ECC.

مدل عددی (پر شده با بتن معمولی)	مقاومت نهایی در کشش	مقاومت نهایی در فشار	سختی اولیه	مدل عددی (پر شده با بتن ECC)	مقاومت نهایی در کشش	مقاومت نهایی در فشار	سختی اولیه
CB-C40-w/o-0-3	463.13	-511.68	124.81	CB-E40-w/o-0-3	504.68	-541.44	134.74
CB-C40-O4-3-3	530.92	-754.57	128.52	CB-E40-O4-3-3	586.84	-791.59	136.85
CB-C40-O8-3-3	541.76	-846.88	131.58	CB-E40-O8-3-3	598.82	-941.25	139.41
CB-C40-O8-6-3	474.05	-745.56	131.22	CB-E40-O8-6-3	518.96	-816.19	138.95
CB-C40-O8-9-3	414.42	-651.77	130.74	CB-E40-O8-9-3	450.10	-707.89	137.43

* واحد مقاومت نهایی مهاربند مورد مطالعه در کشش و فشار، کیلونیوتن و واحد سختی اولیه، کیلونیوتن بر میلیمتر است.

در طراحی سازه‌ها، شکل‌پذیری شاخصی اساسی برای ظرفیت تغییر شکل پلاستیک و ظرفیت اتلاف انرژی پس از تسلیم است. در این مطالعه، ضریب شکل‌پذیری (μ) [۳۸] به صورت رابطه (۴) قابل بیان است:

$$\mu = \Delta_{m,t} / \Delta_{y,t} \quad (4)$$

جابه‌جایی نهایی ($\Delta_{m,t}$) و تسلیم ($\Delta_{y,t}$) برای هر یک از نمونه‌های عددی تعیین و بر اساس آن شاخص شکل‌پذیری محاسبه و مقادیر آن در جداول ۴ و ۵ لیست شده است. نتایج نشان داد در حالتی که مقطع فولادی اصلی مهاربند، خالی از بتن و بدون جداره خارجی است، میانگین شکل‌پذیری در بار فشاری و کششی در بازه ۲/۰۳ تا ۳/۴۱، در حالتی که مهاربندها با بتن پر شده، مقدار شکل‌پذیری میانگین در بازه ۴/۹۵ تا ۵/۸۱ و در حالتی که مهاربندها با بتن ECC پر شده، مقدار شکل‌پذیری میانگین در بازه ۵/۰۸ تا ۵/۹۳ حاصل شده است. این نتایج نشان می‌دهد که نوع مصالح پرکننده و استفاده از جداره خارجی، به دلیل کنترل کمانش هسته اصلی مهاربند، بر μ تاثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، نمونه‌ای که کمترین گپ، بیشترین ضخامت داخلی و خارجی جداره فولادی را دارد و با بتن ECC پر شده است، به دلیل داشتن مقاوم‌ترین مقطع در بار تسلیم، بالاترین ضریب شکل‌پذیری را دارد و عملکرد شکل‌پذیری خوبی از خود نشان دادند. منحنی‌های هیستریزس بار-جابه‌جایی ($P-\Delta$) می‌توانند ظرفیت اتلاف انرژی یک سازه را نشان دهند. بر اساس میزان انرژی کل اتلاف شده که مساحت زیر حلقه‌ها است، ضریب میرایی ویسکوز معادل (ξ_e) [۳۸] برای همه نمونه‌ها در حالات نهایی بر اساس رابطه (۵) محاسبه و در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌اند.

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_e^+ = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{ABC}}{S_{\Delta OBE}} \\ \xi_e^- = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{CDA}}{S_{\Delta ODF}} \end{array} \right\} \rightarrow \xi_e = \frac{\xi_e^+ + \xi_e^-}{2} \quad (5)$$

نتایج نمودار هیستریزس شکل ۱۱ نشان داد که با افزایش جابه‌جایی، به دلیل ورود مصالح به ناحیه پلاستیک، نیرو روند افزایشی داشته است. با توجه به عدم تقارن کشش و فشار BRB، جهت مثبت (+) و جهت منفی (-) یک منحنی چرخه‌ای نتایج به صورت میانگین محاسبه شد. در جداول ۴ و ۵ مقادیر ضرایب میرایی ویسکوز معادل (ξ_e) همه نمونه‌ها آورده شده است. حد بالا و پایین ξ_e در حالتی که مقطع فولادی اصلی مهاربند، خالی از بتن و دارای جداره خارجی است، به ترتیب ۰/۳۰۲ و ۰/۲۱۳، در حالتی که مهاربندها با بتن پر شده، مقدار حد بالا و پایین ξ_e ، ۰/۳۸۲ و ۰/۳۰۶ و در حالتی که مهاربندها با بتن ECC پر شده، مقدار حد بالا و پایین ξ_e ۰/۳۹۸ و ۰/۳۲۱ حاصل شده است. این مقادیر نشان‌دهنده ظرفیت اتلاف انرژی بالای نمونه‌هایی است که بصورت کامپوزیت و دارای جداره خارجی است و ضریب میرایی ویسکوز معادل با افزایش جابه‌جایی بار روند افزایشی داشته است. در نمونه‌هایی که با بتن ECC پر شده است به دلیل رفتار مناسب مصالح در کشش و فشار و مقاومت در برابر کمانش به واسطه جداره خارجی، مقدار مطلق ξ_e منفی بیشتر از مقدار مطلق ξ_e مثبت است. این را می‌توان به اصطکاکی نسبت داد که توسط تماس بین صفحه هسته کامپوزیتی BRB و لوله فولادی محصورکننده پر از بتن در هنگام فشرده شدن BRB ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر، ظرفیت تحمل فشار BRB بیشتر از ظرفیت تحمل کشش آن است.

جدول ۴: مقدار ضریب شکل‌پذیری و میرایی ویسکوز معادل پیشنهادی در حالت توخالی.

مدل عددی (مهاربند توخالی)	ضریب شکل‌پذیری معادل	ضریب میرایی ویسکوز
SB-U-w/o-0-3	2.03	0.213
SB-U-O4-3-3	4.13	0.279
SB-U-O8-3-3	4.21	0.302
SB-U-O8-6-3	3.96	0.294
SB-U-O8-9-3	3.78	0.282

جدول ۵: مقدار ضریب شکل پذیری و میرایی ویسکوز معادل مهاربند پیشنهادی در حالت پرشده با بتن معمول و بتن ECC.

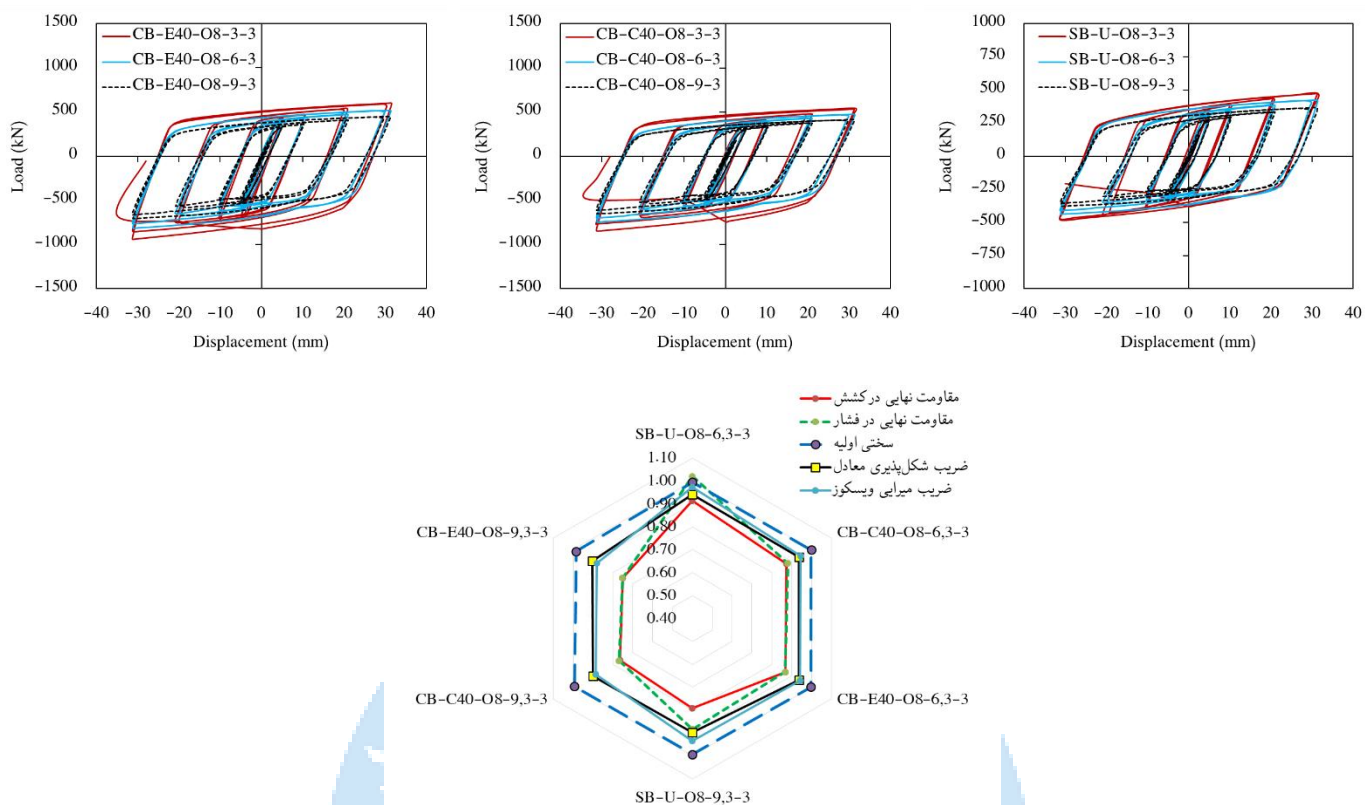
مدل عددی (پرشده با بتن معمولی)	ضریب شکل پذیری معادل	ضریب میرایی ویسکوز	مدل عددی (پرشده با بتن ECC)	ضریب شکل پذیری معادل	ضریب میرایی ویسکوز
CB-C40-w/o-0-3	2.85	0.306	CB-E40-w/o-0-3	2.96	0.321
CB-C40-O4-3-3	4.95	0.365	CB-E40-O4-3-3	5.08	0.381
CB-C40-O8-3-3	5.11	0.382	CB-E40-O8-3-3	5.24	0.398
CB-C40-O8-6-3	4.78	0.361	CB-E40-O8-6-3	4.91	0.375
CB-C40-O8-9-3	4.61	0.339	CB-E40-O8-9-3	4.73	0.351

۱-۵- تاثیر پارامتر فاصله بین جداره داخلی و خارجی مهاربند

به منظور بررسی اثر فاصله بین جداره داخلی و خارجی مهاربند بر منحنی های هیستریس و مقادیر شاخص های عملکردی. در شکل ۱۱ تاثیر فاصله بین جداره داخلی و خارجی مهاربند بر منحنی های هیستریس مهاربند پیشنهادی در حالات مختلف ارائه شده است. برای بررسی تاثیر فاصله بین جداره داخلی و خارجی مهاربند، کمترین فاصله که مقدار آن ۳ میلیمتر است، به عنوان نمونه عددی مرجع انتخاب شد. سپس مقدار شاخص های عملکردی منحنی هیستریس برای ضخامت های ۶ و ۹ میلیمتر نسبت به شاخص های نمونه مرجع محاسبه شده است.

نتایج افزایش فاصله بین جداره داخلی و خارجی مهاربند نشان می دهد در حالتی هسته فولادی مهاربند خالی است، ظرفیت های نهایی بار کششی، بار فشاری، سختی اولیه، ضریب شکل پذیری و میرایی ویسکوز معادل مهاربند پیشنهادی با افزایش فاصله بین جداره داخلی و خارجی مهاربند، کاهش یافته است. مقایسه نتایج مهاربندها، نشان داد با افزایش فاصله بین جداره داخلی و خارجی مهاربند از ۳ به ۶ میلیمتر، مقدار ظرفیت های نهایی بار کششی، بار فشاری و سختی اولیه به ترتیب حداکثر ۹، ۲ و ۰/۶ درصد کاهش داشته است. ضرایب شکل پذیری و میرایی ویسکوز معادل در این حالت نیز به ترتیب حداکثر ۶ و ۲ درصد کاهش داشته است. با افزایش فاصله بین جداره داخلی و خارجی مهاربند از ۳ به ۹ میلیمتر، مقدار ظرفیت های نهایی بار کششی، بار فشاری و سختی اولیه به ترتیب حداکثر ۳۷، ۴۴ و ۲۳ درصد کاهش داشته است. ضرایب شکل پذیری و میرایی ویسکوز معادل در این حالت نیز به ترتیب حداکثر ۱۰ و ۶ درصد کاهش داشته است.

نتایج افزایش فاصله بین جداره داخلی و خارجی مهاربند نشان می دهد در حالتی هسته فولادی مهاربند در حالت پرشده با بتن معمول و بتن ECC است، ظرفیت های نهایی بار کششی، بار فشاری، سختی اولیه، ضریب شکل پذیری و میرایی ویسکوز معادل مهاربند کاهش داشته است. نتایج این گروه نشان داد با افزایش فاصله بین جداره داخلی و خارجی مهاربند از ۳ به ۶ میلیمتر، مقدار ظرفیت های نهایی بار کششی، بار فشاری و سختی اولیه به ترتیب حداکثر ۱۳، ۱۱ و ۰/۳۵ درصد کاهش داشته است. ضرایب شکل پذیری و میرایی ویسکوز معادل در این حالت نیز به ترتیب حداکثر ۴ و ۶ درصد کاهش داشته است. با افزایش فاصله بین جداره داخلی و خارجی مهاربند از ۳ به ۹ میلیمتر، مقدار ظرفیت های نهایی بار کششی، بار فشاری و سختی اولیه به ترتیب حداکثر ۲۲، ۲۴ و ۰/۶۴ درصد کاهش داشته است. ضرایب شکل پذیری و میرایی ویسکوز معادل در این حالت نیز به ترتیب حداکثر ۹ و ۱۲ درصد کاهش داشته است. بطور کلی با افزایش فاصله بین جداره داخلی و خارجی مهاربند شاخص های عملکردی بر اساس منحنی هیستریس روند کاهشی داشته است که بیشترین تاثیر کاهشی آن بر ظرفیت های نهایی بار کششی و بار فشاری است که به دلیل کاهش سطح تماس هسته داخلی مهاربند با جداره خارجی و به دنبال آن کاهش نیروی اصطکاکی است. همچنین با افزایش فاصله بین جداره داخلی و خارجی مهاربند، دامنه کمانش کلی در وسط مهاربند بیشتر و کاهش ظرفیت نهایی بیشتر مشهود است.



شکل ۱۱: تاثیر پارامتر فاصله بین جداره داخلی و خارجی مهاربند بر منحنی‌های هیستریزس مهاربند پیشنهادی.

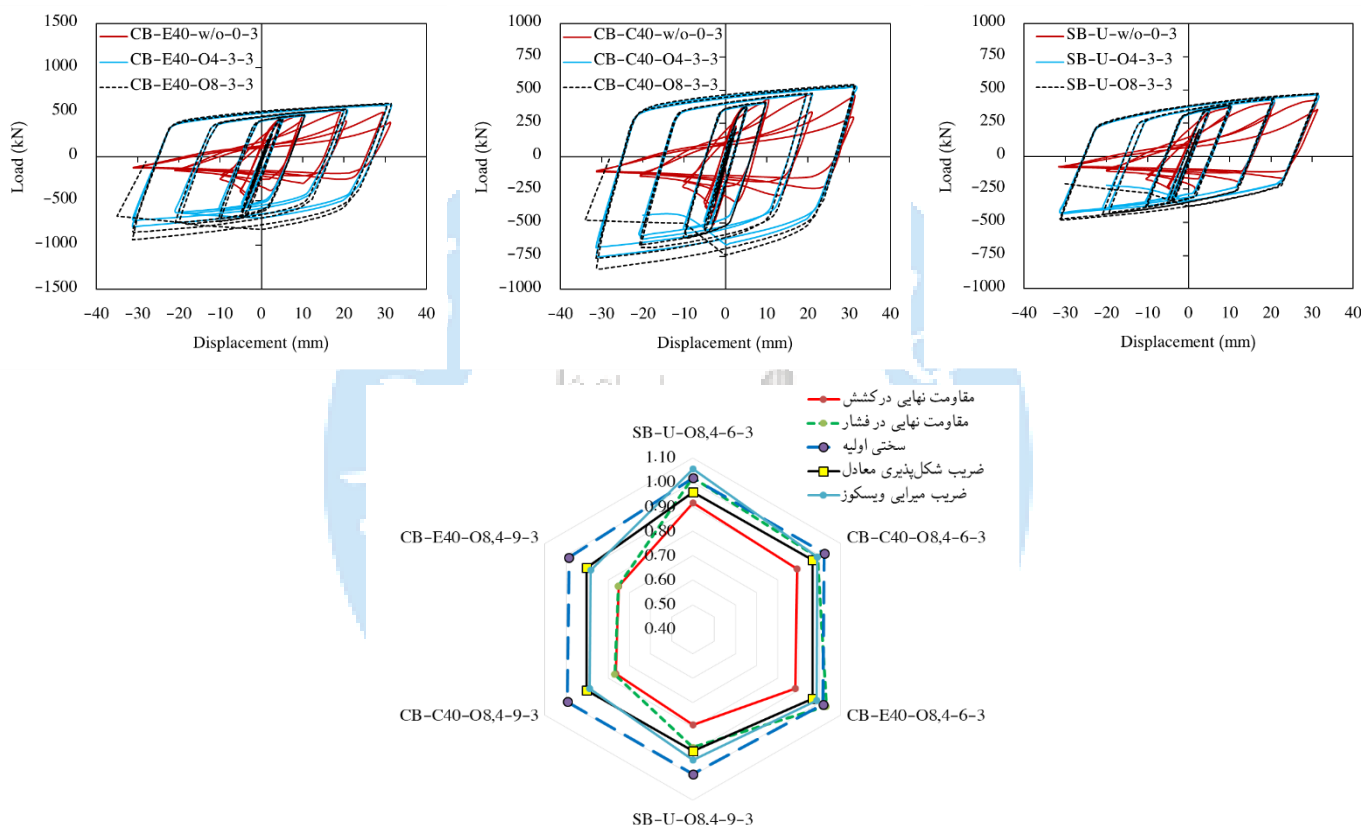
۲-۵- تاثیر جداره خارجی و ضخامت آن

به منظور بررسی تاثیر استفاده از جداره فولادی خارجی و تاثیر ضخامت جداره خارجی بر منحنی‌های هیستریزس و مقادیر شاخص‌های عملکرد آن در شکل ۱۲ تاثیر پارامتر ضخامت جداره خارجی بر منحنی‌های هیستریزس مهاربند پیشنهادی در حالات مختلف ترسیم شده است. برای بررسی تاثیر استفاده از جداره خارجی و ضخامت آن، حالتی که بدون جداره خارجی است، به عنوان نمونه عددی مرجع انتخاب شد. سپس مقدار شاخص‌های عملکردی منحنی هیستریزس برای ضخامت‌های ۴ و ۸ میلیمتر نسبت به شاخص‌های نمونه مرجع محاسبه شده است.

استفاده از جداره خارجی در حالتی که هسته مرکزی فولادی مهاربند خالی باشد، باعث افزایش ظرفیت‌های بارگذاری می‌شود. بررسی نتایج نشان داد که ظرفیت بار کششی نهایی تا ۱۰ درصد، ظرفیت بار فشاری نهایی تا ۵۶ درصد و مقدار سختی اولیه نیز تا ۴ درصد افزایش می‌یابد. ضرایب شکل‌پذیری و میرایی ویسکوز معادل در این حالت نیز به ترتیب حداکثر ۱۱۲ و ۴۴ درصد افزایش داشته است. با افزایش ضخامت جداره خارجی از ۴ به ۸ میلیمتر، مقدار ظرفیت‌های نهایی بار کششی، بار فشاری و سختی اولیه به ترتیب حداکثر ۱/۱۰، ۱۶ و ۲ درصد افزایش داشته است. ضرایب شکل‌پذیری و میرایی ویسکوز معادل در این حالت نیز به ترتیب حداکثر ۶ و ۱۰ درصد افزایش داشته است.

نتایج استفاده از جداره خارجی نشان داد حالتی هسته فولادی مهاربند در حالت پر شده با بتن معمول و بتن ECC است، مقدار ظرفیت‌های نهایی بار کششی، بار فشاری و سختی اولیه به ترتیب حداکثر ۲۲، ۱۰۴ و ۵ درصد افزایش داشته است. ضرایب شکل‌پذیری و میرایی ویسکوز معادل در این حالت نیز به ترتیب حداکثر ۷۷ و ۲۵ درصد افزایش داشته است. با افزایش ضخامت جداره خارجی از ۴ به ۸

میلیمتر، مقدار ظرفیت‌های نهایی بار کششی، بار فشاری و سختی اولیه به ترتیب حداکثر ۳، ۳۱ و ۲ درصد افزایش داشته است. ضرایب شکل‌پذیری و میرایی ویسکوز معادل در این حالت نیز به ترتیب حداکثر ۴ و ۶ درصد افزایش داشته است. بطور کلی استفاده از جداره خارجی سبب افزایش شاخص‌های عملکردی بر اساس منحنی هیستریزس می‌شود که بیشترین تاثیر آن بر شکل‌پذیری و ظرفیت‌های نهایی بار فشاری است. دلیل این افزایش، جلوگیری از کمناش کلی مهاربند و تغییر مود کمناشی آن است که افزایش تغییر شکل پلاستیک را به همراه دارد. این افزایش تغییر شکل پلاستیک نیز رابطه مستقیم با شکل‌پذیری داشته و مقدار آن را افزایش داده است. از طرفی افزایش ضخامت جداره خارجی نیز باعث بهبود شاخص‌های عملکردی شده است که بیشترین تاثیر آن بر ظرفیت‌های نهایی بار فشاری است. این افزایش بار فشاری به دلیل افزایش شعاع ژیراسیون جداره خارجی است که مقاومت در برابر کمناش هسته مهاربندی را کنترل می‌کند.



شکل ۱۲: تاثیر استفاده از جداره خارجی و ضخامت آن مهاربند بر منحنی‌های هیستریزس مهاربند پیشنهادی.

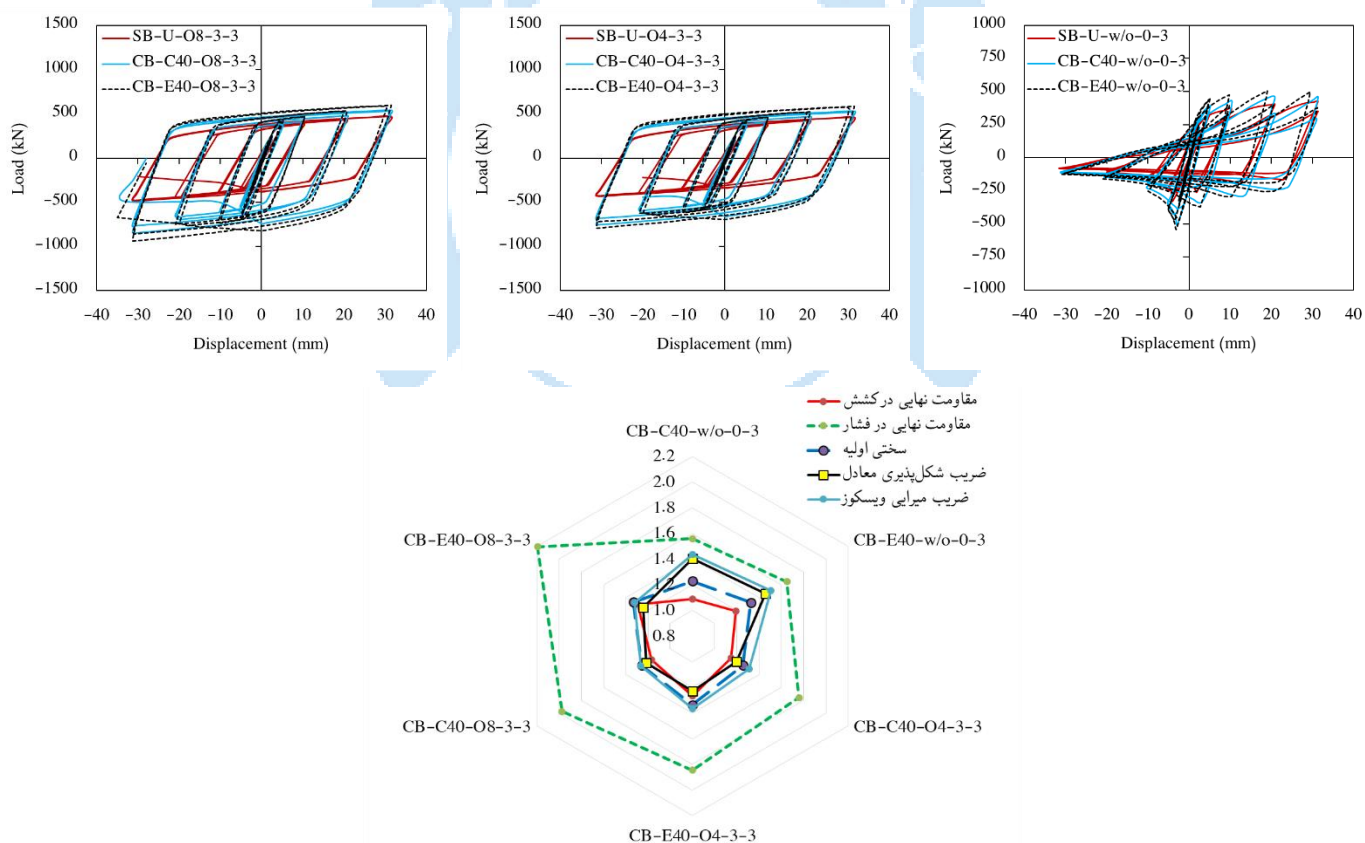
۳-۵- تاثیر پرشدگی هسته فولادی و تاثیر نوع مصالح پرکننده

برای ارزیابی تاثیر پرشدگی هسته فولادی و نوع مصالح پرکننده، یعنی بتن معمولی یا بتن ECC، بر روی منحنی‌های هیستریزس و شاخص‌های عملکردی آن، نمودارهای مختلفی از تاثیر پارامتر پرشدگی هسته فولادی بر منحنی‌های هیستریزس مهاربندهای پیشنهادی در شکل ۱۳ ترسیم شده است. برای انجام مقایسه نسبی و بررسی تاثیر پرشدگی هسته فولادی و تاثیر نوع مصالح پرکننده (بتن معمولی یا بتن ECC)، حالتی که هسته فولادی خالی است، به عنوان نمونه عددی مرجع انتخاب شد. سپس مقدار شاخص‌های عملکردی منحنی هیستریزس برای نمونه‌های عددی پر شده با بتن معمولی یا بتن ECC نسبت به شاخص‌های نمونه مرجع محاسبه شده است.

نتایج نشان داد در حالتی هسته فولادی مهاربند با بتن پر شده است، مقدار ظرفیت‌های نهایی بار کششی، بار فشاری و سختی اولیه به ترتیب حداکثر ۲۹، ۸۶ و ۲۶ درصد افزایش داشته است. ضرایب شکل‌پذیری و میرایی ویسکوز معادل در این حالت نیز به ترتیب

حداکثر ۴۶ و ۵۰ درصد افزایش داشته است. با پرکردن هسته فولادی با بتن ECC به مقاومت ۴۰ مگاپاسکال، مقدار ظرفیت‌های نهایی بار کششی، بار فشاری و سختی اولیه به ترتیب حداکثر ۴۱، ۱۰۶ و ۴۳ درصد افزایش داشته است. ضرایب شکل‌پذیری و میرایی ویسکوز معادل در این حالت نیز به ترتیب حداکثر ۴۹ و ۵۸ درصد افزایش داشته است. بطور کلی استفاده از مصالح پرکننده برای هسته مهاربند، سبب افزایش شاخص‌های عملکردی بر اساس منحنی هیستریزس می‌شود که بیشترین تاثیر آن بر شکل‌پذیری، میرایی ویسکوز معادل و ظرفیت‌های نهایی بار فشاری است. دلیل این افزایش، تقویت صلبیت محوری (EA)، افزایش شعاع ژیراسیون و کاهش لاغری مقطع مهاربندی است.

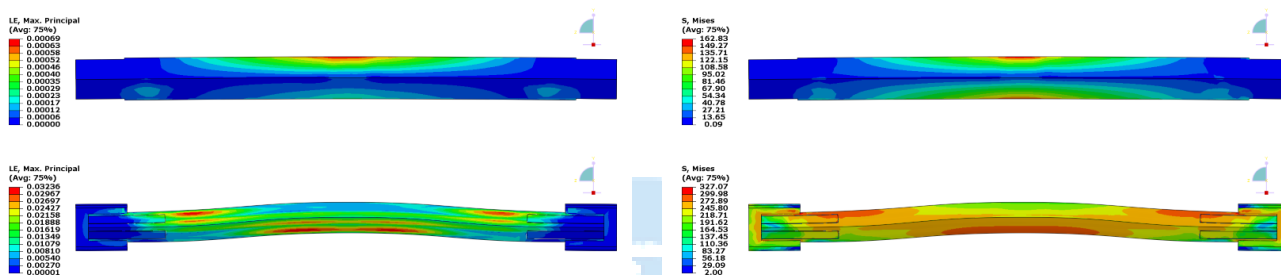
نتایج استفاده از نوع مصالح پرکننده (بتن معمولی یا بتن ECC) نشان داد در حالتی هسته فولادی مهاربند با مصالح بتن ECC پر شود، ظرفیت‌های نهایی بار کششی، بار فشاری، سختی اولیه، ضریب شکل‌پذیری و میرایی ویسکوز معادل مهاربند پیشنهادی نسبت به نمونه‌های عددی پر شده با بتن، افزایش یافته است. در حالتی که هسته فولادی مهاربند پر شده با بتن معمولی و بتن ECC است نتایج نشان داد استفاده از مصالح بتن ECC، مقدار ظرفیت‌های نهایی بار کششی، بار فشاری و سختی اولیه به ترتیب حداکثر ۱۳، ۲۰ و ۱۷ درصد افزایش داشته است. ضرایب شکل‌پذیری و میرایی ویسکوز معادل در این حالت نیز به ترتیب حداکثر ۳ و ۸ درصد افزایش داشته است. بطور کلی استفاده از نوع مصالح پرکننده (بتن معمولی یا بتن ECC) برای هسته مهاربند، سبب افزایش شاخص‌های عملکردی بر اساس منحنی هیستریزس می‌شود که بیشترین تاثیر آن بر سختی اولیه و ظرفیت‌های نهایی بار فشاری است. دلیل این افزایش، رفتار کششی قابل توجه و مناسب مصالح بتن ECC است که افزایش تغییر شکل پلاستیک را به همراه دارد.



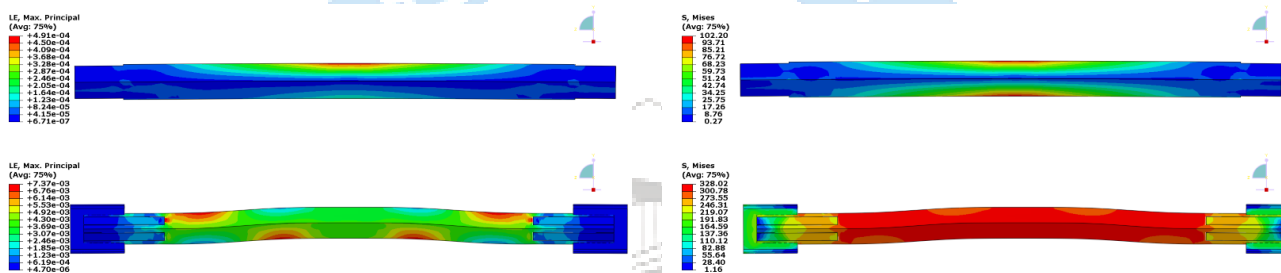
شکل ۱۳: تاثیر تاثیر پرشدگی هسته فولادی و نوع مصالح پرکننده بر منحنی‌های هیستریزس مهاربند پیشنهادی.

۶- بررسی وضعیت توزیع تنش و کرنش

در عملکرد لرزه‌ای مهاربند کمانش‌تاب پیشنهادی، هسته تحت تنش فشاری و کششی و جداره بیرونی تحت تنش فشاری قرار می‌گیرند. تنش در هسته و جداره فولادی بیرونی به دلیل کمانش کلی، به طور غیریکنواخت توزیع می‌شود. در شکل ۱۴ تا ۱۷ وضعیت توزیع تنش و کرنش در حالات مختلف تسلیم و گسیختگی نشان داده شده است. در نمونه‌های مورد مطالعه تا دوران ۰/۵ تا ۱ درصد دررفت، تنش در هسته به طور یکنواخت توزیع می‌شود، زیرا مصالح در مرحله الاستیک خطی هستند. هنگامی دامنه بارگذاری لرزه‌ای افزایش می‌یابد (دامنه بالای ۱ درصد)، هسته شروع به کمانش می‌کند. کمانش باعث می‌شود که تنش در هسته افزایش و توزیع آن نامتقارن گردد. با افزایش تنش، هسته شروع به تغییر شکل پلاستیک می‌کند. تغییر شکل پلاستیک هسته باعث جذب انرژی و کاهش آسیب به سازه می‌شود.



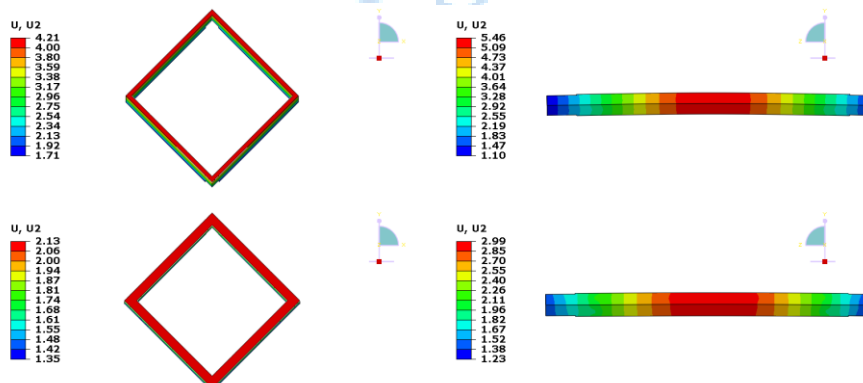
(الف) توزیع تنش مایسز (ب) توزیع کرنش
 شکل ۱۴: توزیع تنش مایسز و کرنش در جداره خارجی و داخلی برای دررفت نسبی ۱ درصد.



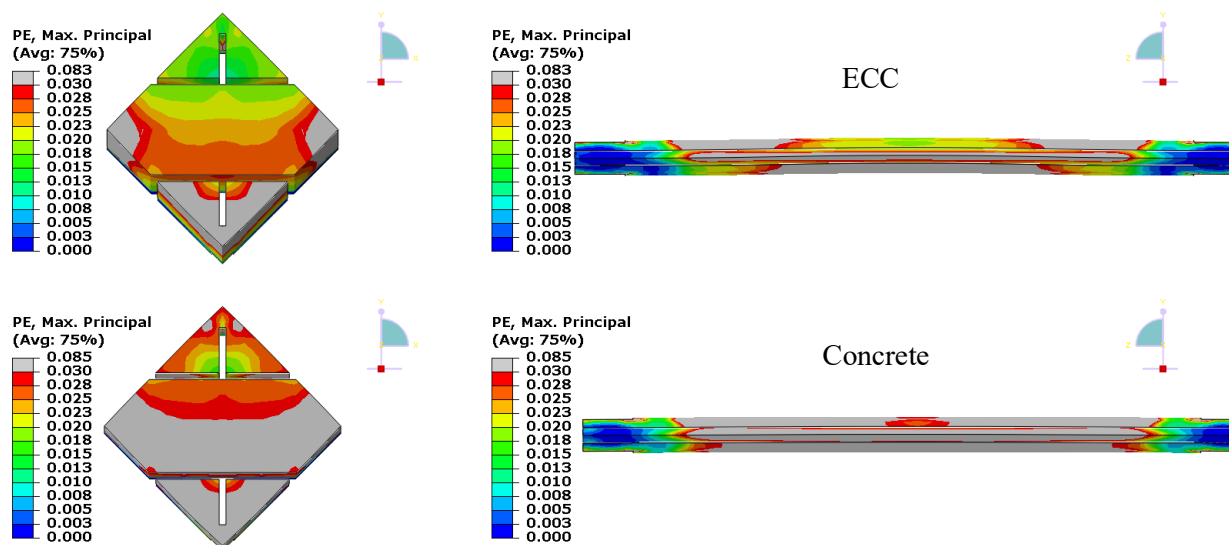
(الف) توزیع تنش مایسز (ب) توزیع کرنش
 شکل ۱۵: توزیع تنش مایسز و کرنش در جداره خارجی و داخلی برای دررفت نسبی ۳ درصد.



(الف) جلوگیری از افزایش دامنه کمانش با وجود جداره خارجی



(الف) توزیع جابجایی ماندگار در راستای طولی (ب) توزیع جابجایی ماندگار در راستای عرضی مقطع
 شکل ۱۶: تاثیر ضخامت ۴ و ۸ میلیمتر بر میزان کمانش کلی جداره خارجی در دررفت نسبی ۳ درصد.



شکل ۱۷: توزیع کرنش ناشی از ترک خوردگی در بتن معمولی و بتن ECC در دریافت نسبی ۳ درصد.
 (الف) توزیع کرنش در راستای طولی (ب) توزیع کرنش در راستای عرضی مقطع

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه ضمن معرفی نوع جدیدی از مهاربند کمانشی تاب، ابتدا ضمن ایجاد مدل عددی با استفاده از نرم افزار اجزا محدود اباکوس به صحت سنجی با نمونه های آزمایشگاهی موجود، صورت گرفته و سپس به بررسی رفتار شبه استاتیک مهاربند کامپوزیتی مقاوم در برابر کمانش تحت بارگذاری رفت و برگشتی برای پارامترهای مختلف پرداخته شد. مدل اجزای محدود مهاربند BRB در ابتدا با یک مدل آزمایشگاهی مرجع [۳۷] صحت سنجی شد و نتایج عددی مدل توسعه داده شده با نتایج نمونه آزمایشگاهی تأیید شد. سپس پاسخ منحنی های هیستریزس برای پارامترهای ضخامت جداره خارجی، تأثیر نوع مصالح پرکننده، تأثیر استفاده از جداره خارجی و فاصله بین جداره داخلی و خارجی بررسی شد. نتایج اصلی به شرح زیر است:

- ۱- حالات خرابی نمونه های مهاربند مقاوم در برابر کمانش به صورت کمانش کلی در وسط مهاربند، توسعه ترک کششی در بتن پرکننده هسته مهاربند، خردشدگی فشاری در بتن ECC پرکننده هسته مهاربند، بیرون زدگی و تغییر شکل خارج از صفحه جداره خارجی نمونه ها مشاهده شده است.
- ۲- همه نمونه هایی که دارای جداره فولادی خارجی و هسته آن که با مصالح بتن های معمولی یا ECC پر شده بود، مناسب بودند دارای عملکرد لرزه ای مناسب بوه و رفتار هیستریزس پایدار و شکل پذیری عالی با افت ناچیز سختی و مقاومت در یک سطح بارگذاری یکسان نشان دادند. استفاده از جداره خارجی و پرکردن هسته فولادی داخلی مهاربند پیشنهادی، تأثیر نسبتاً قابل توجهی بر اتلاف انرژی، شکل پذیری و ظرفیت باربری نمونه ها داشت.
- ۳- استفاده از جداره خارجی و استفاده از مصالح پرکننده هسته فولادی مهاربند تأثیر زیادی بر ظرفیت های نهایی بار فشاری داشت. بطور میانگین پارامتر ضخامت جداره داخلی ۲۰ درصد، پارامتر فاصله بین جداره داخلی و خارجی ۱۲ درصد، پارامتر ضخامت جداره خارجی ۵۱ درصد، پارامتر مقاومت فشاری ۶ درصد، پارامتر نوع مصالح پرکننده هسته ۵۴ درصد افزایش داشته است.
- ۴- استفاده از جداره خارجی و استفاده از مصالح پرکننده هسته فولادی مهاربند تأثیر زیادی بر شکل پذیری داشت. بطور میانگین پارامتر ضخامت جداره داخلی ۵ درصد، پارامتر فاصله بین جداره داخلی و خارجی ۶ درصد، پارامتر استفاده از

جداره خارجی ۸۹ درصد، پارامتر مقاومت فشاری ۲ درصد، پارامتر استفاده از مصالح پرکننده هسته ۴۸ درصد افزایش داشته است.

۵- استفاده از جداره خارجی و استفاده از مصالح پرکننده هسته فولادی مهاربند تاثیر زیادی بر میرایی ویسکوز معادل داشت. بطور میانگین پارامتر ضخامت جداره داخلی ۸ درصد، پارامتر فاصله بین جداره داخلی و خارجی ۵ درصد، پارامتر استفاده از جداره خارجی ۳۱ درصد، پارامتر مقاومت فشاری ۱ درصد، پارامتر استفاده از مصالح پرکننده هسته ۵۴ درصد افزایش داشته است.

مراجع

- [1]. Budaházy, V., & Dunai, L. (2015). Numerical analysis of concrete filled buckling restrained braces. *Journal of Constructional Steel Research*, 115, 92–105.
- [2]. Cai, J., Pan, J., Tan, J., & Vandevyvere, B. (2020). Nonlinear finite-element analysis for hysteretic behavior of ECC-encased CFST columns. *Structures*, 25, 670–682.
- [3]. Chaboche, J.-L. (1986). Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity. *International Journal of Plasticity*, 2(2), 149–188.
- [4]. Fujii, S., & Tagawa, H. (2011). Behavior characteristics of buckling-restrained braces using round steel bar cores and double steel tubes. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 76(659), 167–174.
- [5]. Gonen, T. (2015). Mechanical and fresh properties of fiber reinforced self compacting lightweight concrete. *Scientia Iranica*, 22(2), 313–318.
- [6]. Guan, D., Yang, S., Wang, Z., Jia, L.-J., Guo, Z., & Ge, H. (2020). Concept and behaviour of miniature bar-typed structural fuses with eccentricity. *Journal of Constructional Steel Research*, 166, 105923.
- [7]. Guo, Y.-L., Fu, P.-P., Zhou, P., & Tong, J.-Z. (2016). Elastic buckling and load resistance of a single cross-arm pre-tensioned cable stayed buckling-restrained brace. *Engineering Structures*, 126, 516–530.
- [8]. Guo, Y.-L., Tong, J.-Z., Wang, X.-A., & Zhang, B.-H. (2017). Subassembly tests and numerical analyses of buckling-restrained braces under pre-compression. *Engineering Structures*, 138, 473–489.
- [9]. Haddad, M., & Shrive, N. (2019). Investigating the inelastic cyclic behaviour of large-size steel wide-flange section braces. *Construction and Building Materials*, 199, 92–105.
- [10]. Han, L.-H., & An, Y.-F. (2014). Performance of concrete-encased CFST stub columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 93, 62–76.
- [11]. Han, L. H. (2016). *Steel tube confined concrete structures: theory and practice*.
- [12]. Jia, L.-J., Ge, H., Maruyama, R., & Shinohara, K. (2017). Development of a novel high-performance all-steel fish-bone shaped buckling-restrained brace. *Engineering Structures*, 138, 105–119.
- [13]. Lago, A., Trabucco, D., & Wood, A. (2018). *Damping technologies for tall buildings: Theory, design guidance and case studies*. Butterworth-Heinemann.
- [14]. Lee, C. K., Khan, M. K. I., Zhang, Y. X., & Rana, M. M. (2020). Compressive performance of ECC-concrete encased high strength steel composite columns. *Engineering Structures*, 213, 110567.
- [15]. Li, B., Wang, J., & Wang, Y. (2021). Subassembly test and gusset rotation response of buckling-restrained braced steel frames. *Structures*, 33, 3417–3432.
- [16]. Li, X., Zhou, X., Tian, Y., & Li, M. (2019). A modified cyclic constitutive model for engineered cementitious composites. *Engineering Structures*, 179, 398–411.
- [17]. Luo, L., Sun, X., Song, X., Ou, Z., & Zhang, L. (2022). Experimental and numerical study on the hysteretic behavior of a hybrid timber buckling-restrained brace with a cross-shaped steel core. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 162, 107461.
- [18]. Mateus, J. A. S., Tagawa, H., & Chen, X. (2019). Buckling-restrained brace using round steel bar cores restrained by inner round steel tubes and outer square steel tube. *Engineering Structures*, 197, 109379.
- [19]. Sarti, F., Palermo, A., & Pampanin, S. (2016). Fuse-type external replaceable dissipaters: Experimental program and numerical modeling. *Journal of Structural Engineering*, 142(12), 4016134.
- [20]. Shen, J., Seker, O., Sutchiewcharn, N., & Akbas, B. (2016). Cyclic behavior of buckling-controlled braces. *Journal of Constructional Steel Research*, 121, 110–125.
- [21]. Shi, Q.-X., Wang, F., Wang, P., & Chen, K. (2018). Experimental and numerical study of the seismic performance of an all-steel assembled Q195 low-yield buckling-restrained brace. *Engineering Structures*, 176, 481–499.
- [22]. Simulia, A. U. M. (n.d.). *Dassault systems Simulia Corp.*, 2021,[online].

- [23]. Sitler, B., Takeuchi, T., Terazawa, Y., & Terashima, M. (2022). Experimental investigation of friction at buckling-restrained brace debonding interfaces. *Journal of Structural Engineering*, 148(2), 4021251.
- [24]. Soong, T.-T., & Spencer Jr, B. F. (2002). Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures*, 24(3), 243–259.
- [25]. Takeuchi, T., & Wada, A. (n.d.). *Buckling-restrained Braces and Application*. (2017) Published by The Japan Society of Seismic Isolation. Tokyo, Japan.
- [26]. Takewaki, I. (2009). *Building control with passive dampers: optimal performance-based design for earthquakes*. John Wiley & Sons.
- [27]. Taranath, B. (2011). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 341-10. *Structural Analysis and Design of Tall Buildings*, 355–410.
- [28]. Usami, T., Wang, C., & Funayama, J. (2012). Developing high-performance aluminum alloy buckling-restrained braces based on series of low-cycle fatigue tests. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(4), 643–661.
- [29]. Wang, C.-L., Chen, Q., Zeng, B., & Meng, S. (2017). A novel brace with partial buckling restraint: An experimental and numerical investigation. *Engineering Structures*, 150, 190–202.
- [30]. Wang, C.-L., Liu, Y., Zheng, X., & Wu, J. (2019). Experimental investigation of a precast concrete connection with all-steel bamboo-shaped energy dissipaters. *Engineering Structures*, 178, 298–308.
- [31]. Wang, J., Li, B., Chou, C., & Chen, L. (2018). Cyclic experimental and analytical studies of buckling-restrained braces with various gusset connections. *Engineering Structures*, 163, 38–50.
- [32]. Wu, A., Lin, P., & Tsai, K. (2014). High-mode buckling responses of buckling-restrained brace core plates. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(3), 375–393.
- [33]. Yang, C., Xie, L., An, N., Li, A., Liu, Q., & Wang, X. (2023). Development of a novel parallel double-stage yielding buckling restrained brace: Theoretical, experimental, and numerical investigations. *Journal of Building Engineering*, 68, 106089.
- [34]. Yun, Z., Cao, Y., Takagi, J., Zhong, G., & He, Z. (2022). Experimental and numerical investigation of a novel all-steel assembled core-perforated buckling-restrained brace. *Journal of Constructional Steel Research*, 193, 107288.
- [35]. Zeng, C., Zhang, Y., Zhao, J., Xu, G., Wang, D., & Pan, T. (2023). A partially buckling-restrained brace with T-shaped double core for seismic retrofit: Experimental study, numerical analysis, and local stability design. *Engineering Structures*, 276, 115378.
- [36]. Zhang, A.-L., Wang, H., Jiang, Z.-Q., Guo, K., & Niu, Z.-Y. (2022). Numerical simulation analysis of double yield points assembled buckling-restrained brace with replaceable inner core. *Structures*, 35, 1278–1294.
- [37]. Zhang, S., Tagawa, H., & Chen, X. (2023). Buckling-restrained brace with multiple steel bar cores using SHS outer tube. *Journal of Constructional Steel Research*, 211, 108175.
- [38]. Zhang, Y., Ren, X., Zhang, X. Y., Huang, T. T., Sun, L., & Xie, Y. M. (2021). A novel buckling-restrained brace with auxetic perforated core: Experimental and numerical studies. *Engineering Structures*, 249, 113223.