

ارزیابی عددی مهاربند کمانش تاب مجهز به الاستومر

سید علی رضوی طباطبایی^{۱*}، محمدرضا علیمردانی^۲، عرفان جویانی^۳

۱- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۳۱۴۵۸۷۱، arazavi@usc.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، یک مهاربند کمانش تاب (BRB) نوآورانه مجهز به الاستومر مورد تحلیل عددی قرار گرفت. تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Abaqus انجام شد. اجزای مهاربند شامل غلاف، هسته، و الاستومر نحوه اتصال آن‌ها به یکدیگر تشریح شد. نحوه اتصال الاستومر به سایر اجزا توضیح داده شد. سپس جزئیات مدل‌سازی عددی تشریح گردید. هیستریزیس نیرو-جابجایی BRB مجهز به الاستومر و یک BRB بدون الاستومر و با همان ابعاد مقایسه شد. همچنین توزیع تنش در نقاط بحرانی هسته و غلاف مورد بررسی قرار گرفت. مود خرابی این BRB به صورت کمانش قسمت تسلیم‌شونده هسته دیده شد. مشاهده شد که افزودن الاستومر به BRB موجب افزایش سختی پس از تسلیم و کاهش جابجایی پسماند می‌گردد. مدل‌سازی با نسبت سختی ۲ برابری الاستومر نسبت به نمونه مورد آزمایش نیز مورد بررسی قرار گرفت. این افزایش سختی الاستومر افزایش ۲۰ درصدی سختی پس از تسلیم را نشان داد. همچنین BRB مجهز به الاستومر توانایی جذب انرژی بیشتری نسبت به BRB بدون الاستومر دارد. همچنین در مقایسه با BRBهای مرسوم، مهاربند مجهز به الاستومر حتی پس از گسیختگی هسته، پایداری سازه را به دلیل نقش الاستومر در نواحی بحرانی حفظ می‌نماید. این ویژگی، کارایی بالای این سیستم را در بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی

مهاربند کمانش تاب، BRB، الاستومر، سختی پس از تسلیم

Numerical Evaluation of an Elastomer-Equipped Buckling-Restrained Brace

S.A. Razavi, Mohammad reza Alimardani, Erfan Jovaini

Abstract

In this study, an innovative buckling-restrained brace (BRB) equipped with an elastomer was numerically analyzed. The analyses were performed using Abaqus software. The components of the BRB, including the casing, core, and elastomer, as well as their connections, were described in detail. The elastomer's connection method to other components was also detailed. Subsequently, the numerical modeling process was thoroughly explained. The force-displacement hysteresis of a BRB equipped with elastomer was compared to that of a BRB without elastomer and of the same dimensions. Additionally, stress distribution in critical areas of the core and casing was examined. The failure mode of this BRB was identified as buckling of the yielding portion of the core. It was observed that incorporating an elastomer into the BRB increased the post-yield stiffness and reduced residual displacements. A model with an elastomer stiffness twice that of the experimental specimen was also studied, demonstrating a 20% increase in post-yield stiffness. The BRB equipped with elastomer has a greater energy dissipation capacity compared to the BRB without elastomer. Compared to conventional BRBs, BRBs equipped with elastomers maintained structural stability even after core fractures, owing to the elastomers' role in critical regions. This characteristic highlights the high efficiency of this system in improving the seismic performance of structures.

Keywords

Buckling-Restrained Brace, BRB, Elastomer, Post-Yield Stiffness

اولین مهاربند کمانش تاب در سال ۱۹۸۸ در ژاپن توسعه یافت. پژوهش‌ها نشان داد که اگرچه بتن مسلح با فولاد در ساختمان‌های بلندمرتبه ظرفیت باربری بالایی داشت، اما از نظر شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی عملکرد مطلوبی نداشت [1]. پس از زلزله نورتریج در سال ۱۹۹۴، پژوهشگران آمریکایی طراحی قاب‌های فولادی موجود را بازبینی کردند و علاقه بیشتری به بررسی قابلیت‌ها و مزایای استفاده از مهاربندهای کمانش تاب (BRB) نشان دادند [2]. در سال ۲۰۰۰، یک پژوهش آزمایشگاهی بزرگ مقیاس BRB در دانشگاه برکلی انجام شد [3]. اولین مجموعه دستورالعمل‌های طراحی برای قاب‌های مهاربندی کمانش تاب (BRBF) معرفی شد و در سال‌های بعد، کاربردهای متعددی برای BRB‌ها ارائه گردید. در سال ۲۰۱۵، کرستینگ و همکاران دستورالعمل طراحی لرزه‌ای BRBF را منتشر کردند که راهنمایی‌هایی برای ساخت BRB‌ها و همچنین تحلیل و طراحی سیستم‌های BRBF ارائه داد [4]. فولاد کربنی با مقاومت تسلیم حدود ۲۳۵ مگاپاسکال به دلیل مقاومت، شکل‌پذیری و قابلیت جوشکاری بالا، طی دهه‌های گذشته به طور گسترده در سازه‌های فولادی استفاده شد. هسته بیشتر BRB‌های اولیه از این نوع فولاد ساخته شده است. اولین BRB‌های ساخته‌شده در سال ۱۹۸۸ با استفاده از فولاد JIS SS41 (نام قدیمی SS400 [5]) تولید شدند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که این نوع BRB‌ها رفتار چرخه‌ای پایدار و ظرفیت جذب انرژی خوبی دارند. همچنین، به دلیل اقتصادی بودن و ساخت آسان، همچنان استفاده از این نوع فولاد در ساخت BRB‌ها رایج است.

BRB‌های تمام فولادی با قرار دادن هسته BRB میان لایه‌های فولادی و استفاده از پوشش‌های جداشدنی، امکان تعویض آسان هسته آسیب‌دیده را پس از زلزله‌های متعدد فراهم می‌کند. این طراحی، علاوه بر افزایش دوام و کارایی سازه، قابلیت بازسازی و استفاده مجدد از مهاربندها را بهبود داده و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را کاهش می‌دهد. جزئیات متنوعی برای توسعه این سیستم‌ها ارائه شده که عملکرد لرزه‌ای آن را ارتقا می‌بخشند [6].

ظرفیت جذب انرژی یک BRB به طور عمده به هسته آن بستگی دارد. هسته به عنوان یک میراگر فلزی تسلیمی عمل کرده که انرژی را از طریق تغییر شکل غیر الاستیک جذب می‌کند. هرچه هیستریزس غیر الاستیک تولید شده در بخش تسلیم هسته بیشتر باشد، انرژی بیشتری جذب می‌شود. بنابراین، هسته‌هایی که از

موادی با نقطه تسلیم پایین و شکل‌پذیری بالا مانند فولاد با نقطه تسلیم پایین ساخته شده‌اند، مطلوب‌تر هستند زیرا ظرفیت جذب انرژی بالایی دارند [9].

هسته‌های ساخته شده از آلیاژهای آلومینیومی به دلیل شکل‌پذیری پایین‌تر از فولاد، مطلوب نیستند. در پژوهشی، دوسیکا و همکاران مهاربندی سبک‌وزن با هسته آلومینیومی و لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای را بررسی کردند که وزن مهاربند را به طور قابل توجهی کاهش داد [10]. همچنین، هسته‌های ساخته شده از لوله‌های فولادی می‌توانند ظرفیت جذب انرژی بالایی داشته باشند و هسته‌های سوراخ‌دار نیز به دلیل رفتار هیستریزس مناسب، مطلوب هستند. ظرفیت جذب انرژی BRB‌ها معمولاً با ظرفیت تغییر شکل پلاستیک تجمعی و میرایی ویسکوز معادل اندازه‌گیری می‌شوند. علاوه بر عملکرد به عنوان یک میراگر، BRB به عنوان یک عضو مقاوم در برابر نیروی جانبی نیز عمل می‌کند که قادر به تحمل بار قابل توجه و سختی قابل توجهی برای سازه‌ها و به‌ویژه در ساختمان‌های بلندمرتبه است [9]. برج تیانجین ۱۱۷ یکی از بلندترین ساختمان‌ها در چین است. سیستم مقاوم در برابر نیروی جانبی آن از یک هسته بتن مسلح و سیستم قاب بزرگ مهاربندی شده تشکیل شده است. مشخصات طراحی برای پنج طبقه اول نیاز به فضای باز داشت. برای جلوگیری از ایجاد مکانیزم طبقه نرم، مهاربندهای کمانش تاب بزرگ به طول حدود ۴۸ متر در این طبقات به صورت شورون قرار داده شده‌اند [11]. برج ناگویا لوسنت یک آسمان‌خراش ۴۰ طبقه در ناگویا، ژاپن است. سیستم مقاوم لرزه‌ای مورد استفاده برای جذب انرژی لرزه‌ای و اطمینان از ایمنی ساختمان در برابر زلزله‌های طولانی مدت، شامل مجموعه‌ای از ستون‌های لوله‌ای فولادی پر شده با بتن و سیستم کنترل ارتعاش ساخته شده از BRB‌ها است [12]. اگر ظرفیت باربری و سختی اولویت‌های اصلی طراحی باشند، BRB‌هایی که از لوله‌های فولادی و مقاطع صلیبی ساخته شده‌اند، مطلوب هستند زیرا این مقاطع دوطرفه بوده و استحکام خمشی و سختی یکسانی در هر دو محور اصلی دارند. هزینه‌های مواد، میزان برش و جوشکاری مورد نیاز و سهولت سرهم‌بندی قطعات عواملی هستند که بر قیمت نهایی محصول تاثیر می‌گذارند. در این راستا، BRB‌های ساخته‌شده از لوله فولادی پر شده با بتن هنوز به عنوان مقرون به صرفه‌ترین گزینه‌ها محسوب می‌شوند. با این حال، با پیشرفت‌های صورت‌گرفته در تحقیقات مواد و تکنیک‌های ساخت و با تکمیل انتقال BRB‌ها از فاز توسعه به فاز تولید احتمالاً هزینه‌ها کاهش خواهد یافت [9].

دادند. برخلاف نتایج به دست آمده از آزمایش های اجزای جداگانه، قاب مجهز به DC-SCBs بالاترین میزان جذب انرژی را در بین تمامی قاب های آزمایشی نشان داد. این به سختی بالای پس از تسلیم نسبت داده شد [21]. دی آیلو و همکاران دو BRB تمام فولادی قابل جدا شدن را آزمایش کردند که شامل یک صفحه فولادی مستطیلی و یک پوشش فولادی مهارکننده بودند که دو شکل به صورت امگا را تشکیل می دادند و با پیچ به هم متصل شده بودند. این مهاربند تمام فولادی تا دامنه دررفت طبقه ۱,۵٪ واکنش متقارن نشان داد که معادل با کرنش ۲,۵٪ در هسته بود [6]. مژولانی و همکاران برای بهسازی ساختمان های دو طبقه بتن مسلح غیر شکل پذیر، یک BRB فولادی پیچ شده را آزمایش کردند. عملکرد جلوگیری از کمانش این مهاربند توسط دو لوله فولادی مستطیلی تامین شده بود که با اجزا سخت کننده پیچ شده به یکدیگر متصل شده بودند. این مهاربند با شکل پذیری ۱۵ عملکرد خوبی از خود نشان داد [7]. چو و چن نوع خاصی از BRB های لایه ای را معرفی کردند که در آن نیازی به استفاده از مواد بدون چسبندگی نبود. پوشش های این مهاربندها از یک کانال فولادی جوش شده به یک صفحه تخت تشکیل شده و با بتن با مقاومت ۴۸ تا ۵۸ مگاپاسکال پر شده بود. این پوشش ها با استفاده از پیچ به یکدیگر متصل می شدند. طراحی ارائه شده توسط نویسندگان شامل دستورالعمل هایی برای تامین پایداری کلی مهاربند، سختی موضعی پوشش ها و ظرفیت محوری پیچ های اتصال بر اساس طول موج کمانش در مودهای بالاتر بود. نتایج آزمایش ها نشان داد که در صورت تامین سختی خمشی کافی برای پوشش ها، مهاربندهای پیشنهادی در تغییر شکل جانبی ۲,۴٪ و شکل پذیری پلاستیک تجمعی مناسب، پاسخ هیستریزس مناسبی از خود نشان دادند [22].

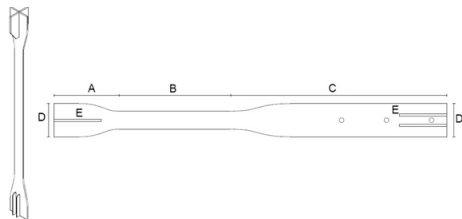
رضوی و همکاران به بررسی و توسعه RLBRB ها پرداختند. این پژوهش شامل طراحی، ساخت و آزمایش دو نمونه مهاربند تمام فولادی بود. نمونه ها تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفتند و بدون بروز شکست های کلی یا موضعی، کرنش های محوری بالای ۵٪ تحمل کردند. رفتار هیستریزس نمونه ها پایدار و متقارن بود. همچنین، مدل های عددی توسعه یافت و تحلیل های چرخه ای غیرخطی انجام شد که به درک بهتر از عملکرد هسته و غلاف ها و کاربرد RLBRB در سیستم های مهاربندی کمک کرد. نتایج نشان داد که کاهش طول هسته باعث بهبود عملکرد لرزه ای، کاهش تغییر مکان های باقی مانده و افزایش ظرفیت اتلاف انرژی می شود [23].

در حالی که آزمایش چرخه ای یک محوری می تواند رفتار چرخه ای BRB را نشان دهد، برای بررسی اثرات تعامل میان نمونه BRB، تیرها و ستون ها آزمایش های بیشتری نیاز است. در سال ۲۰۱۲، سارنو و مانفردی آزمایش های مقیاس کامل را بر روی دو ساختمان قاب بتن مسلح انجام دادند، یکی با بازسازی با استفاده از BRB و دیگری بدون آن. نتایج آزمایش نشان داد که پاسخ لرزه ای قاب بازسازی شده می تواند به طور مؤثر با استفاده از سختی محوری و نیروی تسلیم BRB ها کنترل شود [13].

BRBF ها به دلیل ترکیب سختی و شکل پذیری بالا به عنوان یکی از سیستم های مقاوم جانبی مؤثر شناخته می شوند. کاهش طول BRB و ترکیب آن با مهاربندهای الاستیک، مزایای متعددی مانند کاهش مواد مصرفی، هزینه های تولید و تسهیل در نصب و تعویض پس از زلزله دارد. مطالعات نشان می دهند که کاهش طول BRB تأثیر چشم گیری بر سطح مقطع هسته مورد نیاز ندارد و سیستم های مهاربند با طول کاهش یافته (RLBRBs) عملکرد بهتری در توزیع پلاستیسیته در ارتفاع سازه و کاهش تغییر مکان های باقی مانده و بیشینه دارند. همچنین، این مهاربندها اقتصادی تر از نمونه های بلند بوده و قابلیت جابجایی و جایگزینی ساده تری پس از زلزله فراهم می کنند [14], [15].

در سال ۲۰۱۴، پالمر و همکاران نتایج آزمایش های یک BRBF دو بعدی و سه بعدی را ارائه کردند و نشان دادند که BRB ها در یک ساختار سیستم، تقاضاهای متفاوتی نسبت به آزمایش یک محوره ساده دارند [16]. در سال ۲۰۱۵، ماهرنولتز و همکاران آزمایش های مقیاس بزرگ بر روی BRB های متصل به قاب های بتن مسلح با انکرها ی بتن پسا نصب شده انجام دادند و نشان دادند که هم شکل پذیری و هم مقاومت قاب ها می تواند به سطح عملکرد لرزه ای بسیار بالا افزایش یابد [17]. در سال ۲۰۱۶، پان و همکاران به جای استفاده از انکرها ی پسا نصب شده، استفاده از BRBF ساخته شده درون قاب های بتن مسلح برای بهبود مقاومت جانبی، سختی، شکل پذیری و جذب انرژی پیشنهاد کردند [18]. در سال ۲۰۱۸، گواررو و همکاران آزمایش های لرزه ای بر روی یک قاب چهار طبقه مقیاس شده مجهز به BRB انجام دادند و نشان دادند که BRB ها گزینه ای عالی برای ساختمان های پیش ساخته در نواحی با لرزه خیزی بالا هستند زیرا می توانند به طور قابل توجهی میرایی را افزایش دهند، اثرات کاهش سختی را به تأخیر بیندازند و دررفت طبقات و جابه جایی های جانبی سازه را کاهش دهند [19], [20]. در سال ۲۰۱۹، چو و همکاران آزمایش های چرخه ای بر روی سه قاب فولادی مقیاس کامل دو طبقه با یک دهانه مجهز به مهاربند خود مرکز (DC-SCBs)، BRB و ترکیبی از این دو انجام

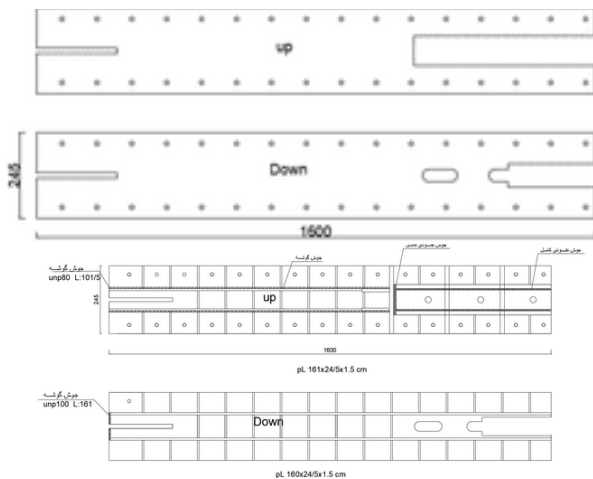
کرد: قسمت A و C به عنوان بخش‌های غیرتسلیم‌شونده در نظر گرفته شده‌اند، در حالی که بخش تسلیم‌شونده را تشکیل می‌دهد. D به عرض یا پهنای هسته اشاره دارد و E مربوط به سخت‌کننده‌های هسته می‌باشد.



شکل ۲- تصویر شماتیک هسته

۲-۲- غلاف فولادی

غلاف به عنوان یک پوشش برای جلوگیری از کمانش جانبی یا موضعی هسته در هنگام بارگذاری فشاری عمل کرده و امکان بهره‌گیری از ظرفیت کامل محوری هسته را فراهم می‌کند. غلاف در BRBها یکی از اجزای اصلی و بسیار مهم محسوب می‌شود. در این آزمایش، غلاف از ورق فولادی تهیه و اجرا شده است. ورق اصلی مورد استفاده برای ساخت غلاف هسته دارای ضخامت ۱۵ میلی‌متر، عرض ۲۴٫۵ سانتی‌متر و طول ۱۶۰ سانتی‌متر است. غلاف به صورت دو قطعه از بالا و پایین هسته به یکدیگر متصل می‌شود. در شکل (۳) شماتیک قسمت رو به هسته غلاف بالا و پایین نمایش داده شده است.

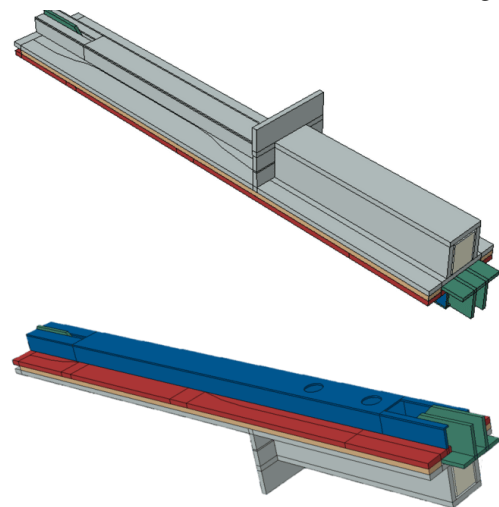


شکل ۳- شماتیک غلاف BRB

در این مطالعه ابتدا یک مهاربند کمانش‌تاب ابداعی مجهز به الاستومر معرفی شده و سپس با مدلسازی عددی BRB مجهز به الاستومر و بدون آن در نرم‌افزار آباکوس، این ابداعی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در انتها نیز تاثیر سختی الاستومر بر روی نتایج عددی بررسی می‌گردد.

۲- معرفی BRB ابداعی مجهز به الاستومر

BRB ابداعی مطابق سایر BRBها شامل هسته فولادی، غلاف فولادی و پرکننده است با این تفاوت که به وسیله یک الاستومر هسته به غلاف متصل می‌شود. نمونه نهایی در شکل (۱) نمایش داده شده است. در ادامه اجزا تشکیل‌دهنده این BRB معرفی می‌شود.



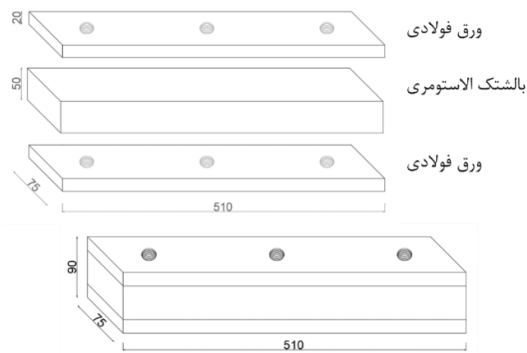
شکل ۱- BRB ابداعی مجهز به الاستومر

۲-۱- هسته فولادی

وظیفه اصلی هسته، تحمل نیروهای محوری فشاری و کششی است که در طول چرخه‌های بارگذاری وارد می‌شوند. این عضو با طراحی مناسب برای تغییرشکل‌های بزرگ، رفتار غیرخطی مطلوبی از خود نشان داده و عمده انرژی لرزه‌ای را از طریق تغییرشکل پلاستیک جذب و مستهلک می‌کند. هسته مرکزی این BRB ابداعی مشابه سایر BRBها از یک هسته فولادی (شکل (۲)) تشکیل شده است که در آن به ۴ قسمت اصلی می‌توان اشاره

جدول ۱- مشخصات نمونه‌ها (cm)

نمونه	عرض ابتدا و انتهای هسته (D)	عرض قسمت تسلیم‌شونده هسته (B)	ضخامت هسته	طول هسته	سخت‌کننده‌های هسته (E)	ابعاد الاستومر
A-1	14	7.5	1	166	20×8×1	ندارد
A-2	14	7.5	1	166	20×8×1	51×5×9



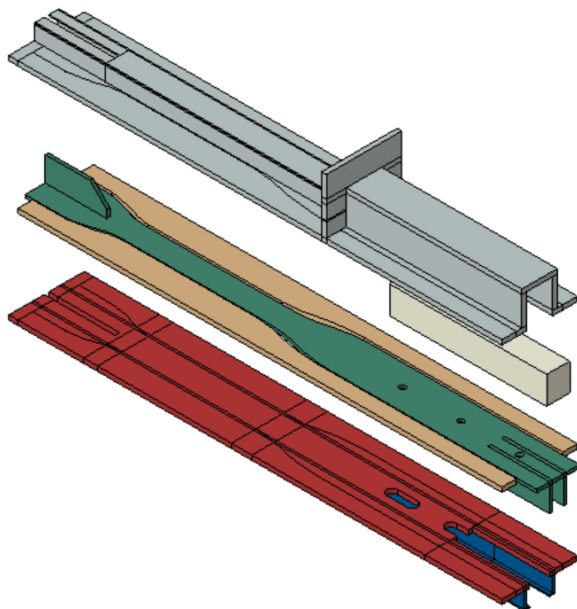
شکل ۶- شماتیک الاستومر



شکل ۷- یک نمونه الاستومر نئوپرن

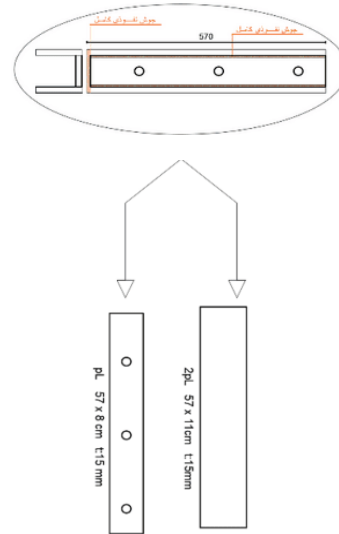
۲-۵- سرهم‌بندی

پس از نصب هسته بر روی غلاف پایین، پرکننده‌ها در کنار هسته قرار گرفته با قرارگیری غلاف بالا، الاستومر در جای خود بین هسته و غلاف متصل می‌شود. وضعیت نهایی BRB ساخته شده در شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل ۸- سرهم‌بندی BRB مجهز به الاستومر

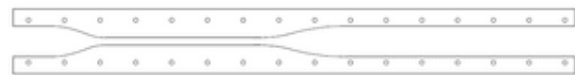
برای نصب الاستومر در BRB، غلافی متشکل از سه ورق فولادی ساخته شده است: دو ورق با ضخامت ۱۵ میلی‌متر، عرض ۱۱ سانتی‌متر و طول ۵۷ سانتی‌متر و یک ورق با همان ضخامت، عرض ۸ سانتی‌متر و طول ۵۷ سانتی‌متر (شکل (۴)). این ورق‌ها با جوش نفوذی کامل به شکل ناودانی مونتاژ شده تا الاستومر مهار شود. برای مقابله با تغییر مکان‌ها، کمانش، پیچش و ناپایداری نمونه، در دو سمت نمونه دو ناودانی تعبیه شده است. در سمت دارای الاستومر از ناودانی سایز ۸ با طول ۱۰۱٫۵ سانتی‌متر و در سمت فاقد الاستومر از ناودانی سایز ۱۰ با طول ۱۶۰ سانتی‌متر استفاده شده است.



شکل ۴- شماتیک غلاف الاستومر BRB

۲-۳- پرکننده

در BRBها، برای پرکردن فضای خالی میان هسته و غلاف و حفظ فاصله مناسب از پرکننده‌ها استفاده می‌شود که پس از سرهم‌بندی، با غلاف یکپارچه می‌شوند. طول آن ۳ سانتی‌متر کوتاه‌تر از غلاف در نظر گرفته شده است. شکل (۵) پرکننده‌های BRB مجهز به الاستومر نمایش داده شده است.



شکل ۵- شماتیک غلاف BRB

۲-۴- الاستومر

در این BRB، از بالشتک الاستومری نئوپرن استفاده شده که مطابق شکل (۶) بین دو ورق فولادی مساوی مواد لاستیکی الاستومر در این ساختار جای گرفته است. در شکل (۷) نیز یک نمونه الاستومر نئوپرن نشان داده شده است.

۳- مدل سازی

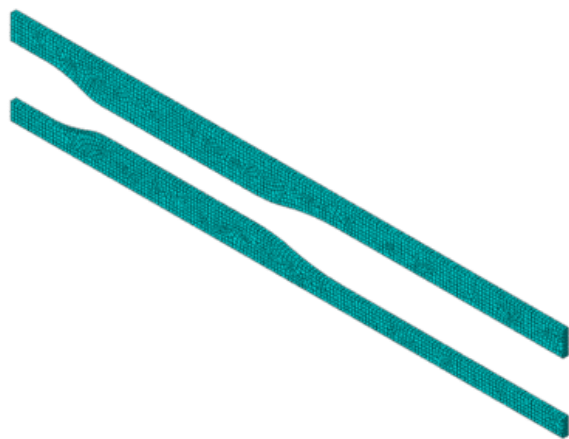
از نرم افزار ABAQUS برای مدل سازی عددی BRB استفاده شد. در این بخش به نحوه مدل سازی BRB و اجزا آن پرداخته می شود.

۳-۱- مش

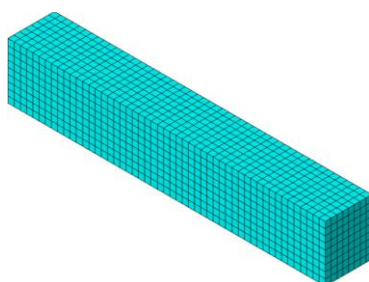
مطابق بخش ۲ این BRB از ۴ جز اصلی شامل هسته، غلاف، پرکننده و الاستومر تشکیل شده است. شکل (۹) الی شکل (۱۴) به ترتیب مش اجزا ساخته شده نمایش داده شده است. مش های همه اجزا از نوع ^۱C3D8R است. بررسی حساسیت مش نیز انجام شد. اندازه مش در اجزا از ۵ میلی متر تا ۲۰ میلی متر متغیر است.



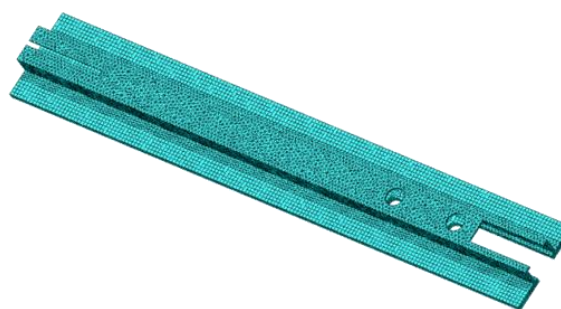
شکل ۹- مش هسته BRB



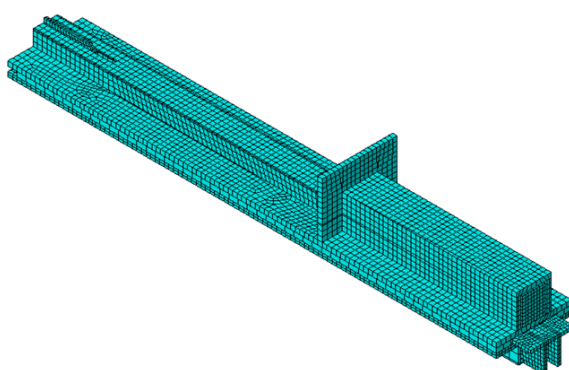
شکل ۱۲- مش پرکننده های BRB



شکل ۱۳- مش الاستومر BRB



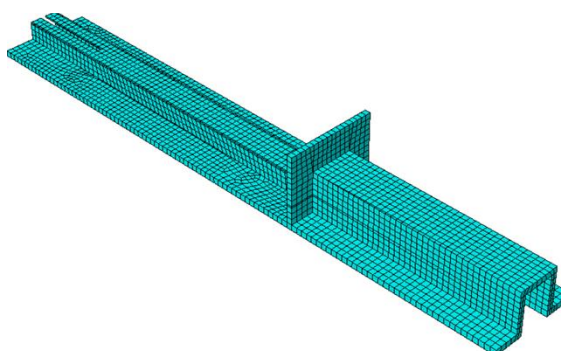
شکل ۱۰- مش غلاف پایین BRB



شکل ۱۴- مش سرهم بندی کامل نمونه BRB مجهز به الاستومر

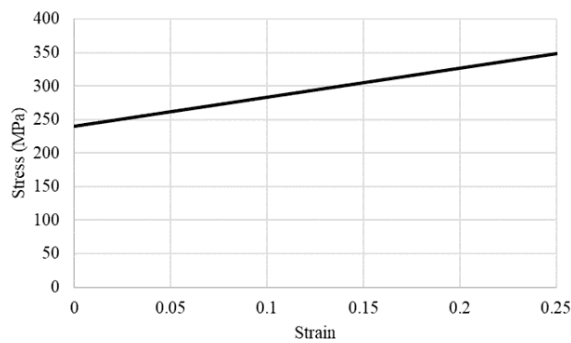
۳-۲- حلگر

در این مدل تحلیل با استفاده از حلگر Dynamic/Explicit انجام می شود چراکه در مقایسه با حلگر Abaqus/Standard، قابلیت بالایی در حل مسائل با ماهیت غیرخطی های بالا دارد. همچنین تعداد تماس بین سطوح در این مسئله بالاست، بنابراین برای همگرایی بیشتر از این حلگر استفاده می شود. و نیز حلگر Dynamic/Explicit برای مسائل با نرخ تغییرات بالا، نظیر ضربه، برخورد و انفجار یا سطوح پیچیده توسعه یافته و کاربرد دارد.



شکل ۱۱- مش غلاف بالا BRB

^۱ 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control



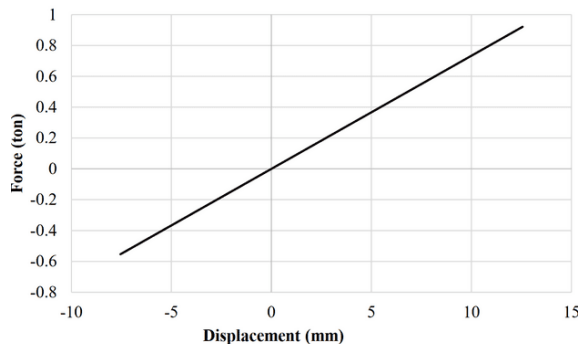
شکل ۱۷- نمودار تنش-کرنش واقعی فولاد St37

مطابق آزمایش انجام شده بر روی یک قطعه الاستومر (شکل (۷)) نمودار نیرو-جابجایی الاستومر مطابق شکل (۱۸) است. مقدار سختی آن برابر ۷۵۰ نیوتون بر میلی‌متر محاسبه می‌شود. جدول (۳) محاسبات مربوط به مدول برشی و الاستیسته آن نمایش داده شده است. مطابق آن مقدار ضریب پواسون الاستومر برابر ۰,۵ و تراکم‌ناپذیر (برای همگرایی نتایج ۰,۴۹ فرض می‌شود) در نظر گرفته شده و مقدار مدول الاستیسته برابر مقدار ۵,۲۸ مگاپاسکال محاسبه می‌شود.

جدول ۳- محاسبات ضرایب مدول برشی و الاستیسته الاستومر

$$K = G \times \frac{A}{L} \rightarrow 750 = G \times \frac{510 \times 75}{90} \rightarrow G = 1.76 \text{ MPa}$$

$$\text{if } \nu = 0.5 \rightarrow E = 2(G)(1 + \nu) = 5.28 \text{ MPa}$$



شکل ۱۸- نمودار نیرو-جابجایی الاستومر

۳-۴- قیود

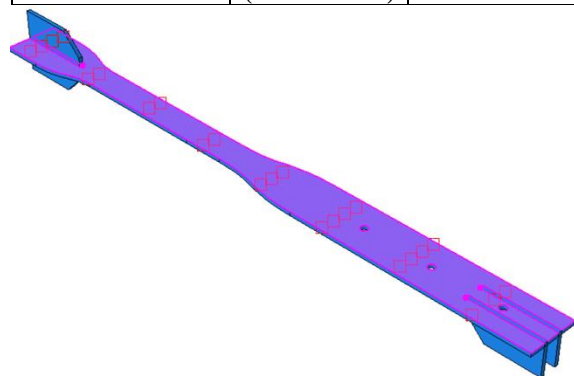
در مدل اصلی پیچ‌ها موجب اتصال غلاف و پرکننده‌ها می‌شود. در مدلسازی عددی صفحات بین این دو قطعه به یکدیگر توسط قید Tie به یکدیگر متصل می‌شود. همچنین یک صفحه به انتهای غلاف و هسته نیز توسط قید Tie متصل شده که در انتها، این صفحه انتهایی به طور کامل مقید شده است. در BRB مجهز به

۳-۳- تماس

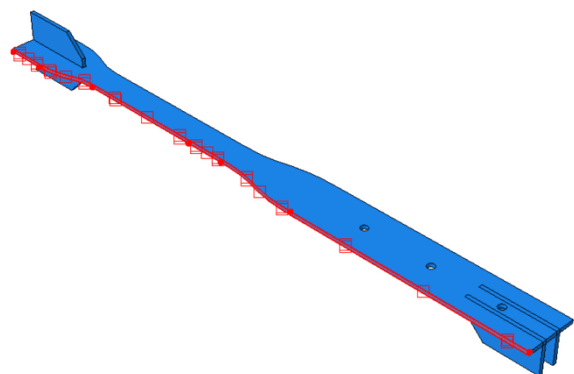
در BRB دو تماس تعریف شده است: یک تماس بین صفحه بیرونی هسته و صفحات داخلی غلاف بالا و پایین و تماس دیگر مطابق شکل بین صفحات مجاور پرکننده‌ها و صفحه مجاور هسته. مطابق جدول (۲) تماس از نوع surface to surface و دو نوع رفتار مماسی و عمودی با ضریب ۰,۳ تعریف شده است. توجه می‌شود که رفتار مماسی در تماس بین هسته و غلاف از نوع Frictionless در نظر گرفته شده است. بنابراین تماس مطابق شکل (۱۵) صفحات بین هسته و غلاف‌ها از نوع IntProp1 (بدون اصطکاک) و بین هسته و پرکننده از نوع IntProp2 (با ضریب اصطکاک برابر ۰,۳) و مطابق شکل (۱۶) است.

جدول ۲- مشخصات خصوصیات تماس بین اجزا

Interaction property	Tangential behavior	Normal behavior
IntProp1	Frictionless	Hard Contact
IntProp2	Penalty (Coefficient=0.3)	Hard Contact



شکل ۱۵- نمونه صفحه تماس هسته با غلاف

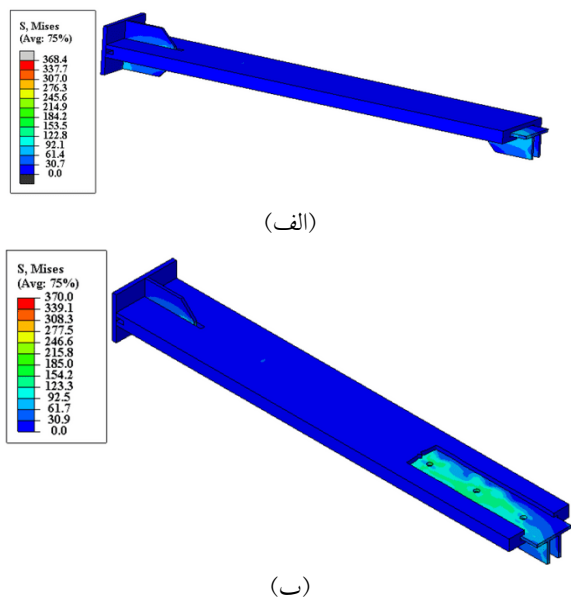


شکل ۱۶- نمونه صفحه تماس هسته با پرکننده

۳-۳- مصالح

تمامی اجزا BRB فوق از نوع فولاد St37 در نظر گرفته شد. مطابق شکل (۱۷) نمودار تنش، کرنش واقعی آن نشان داده شده است.

قسمت غیرخطی در BRB مجهز به الاستومر افزایش می‌یابد. شکل (۱۹) قسمتی از غلاف به همراه هسته فولادی در هر دو نمونه BRB نمایش داده شده است. در این شکل برای سهولت نمایش، تنش‌های وارد بر قسمت‌های داخلی غلاف، از سایر اجزا BRB صرف نظر شده است. تنش‌های زیادی در غلاف هر دو نمونه مشاهده نمی‌شوند.



شکل ۱۹- توزیع تنش در نمونه: (الف) BRB بدون الاستومر (ب) BRB مجهز به الاستومر

در شکل (۲۰) توزیع تنش در غلاف فولادی برای هر دو نمونه دیده می‌شود. با توجه به این توزیع، حداکثر تنش حدود ۵۰ مگاپاسکال در صفحه انتهایی هر دو نمونه دیده می‌شود. با این حال مقدار تنش حدود ۳۰ مگاپاسکالی در وسط غلاف، درست

الاستومر صفحه بالای الاستومر به غلاف متصل و صفحه پایین آن به هسته متصل است. در BRB بدون الاستومر مشابه BRB های مرسوم غلاف بالا بدون الاستومر بوده و به جای الاستومر یک صفحه در امتداد هسته قرار می‌گیرد.

۳-۵- بارگذاری

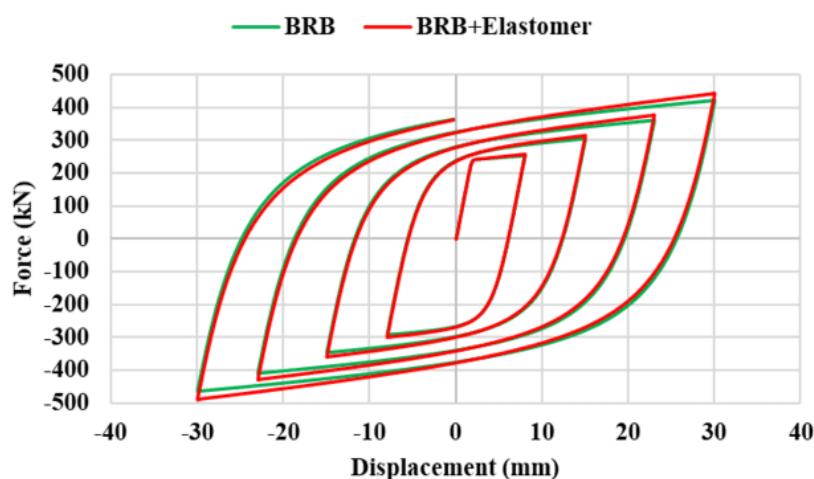
برای بارگذاری یک جابجایی با تابع Smooth به صفحه ابتدایی هسته داده شد. پروتکل بارگذاری مطابق جدول (۴) است.

جدول ۴- مقادیر بارگذاری

Time/Step	Displacement (mm)
0	0
0.125	8
0.375	-8
0.625	15
0.875	-15
1.125	23
1.375	-23
1.625	30
1.875	-30
2	0

۴- نتایج

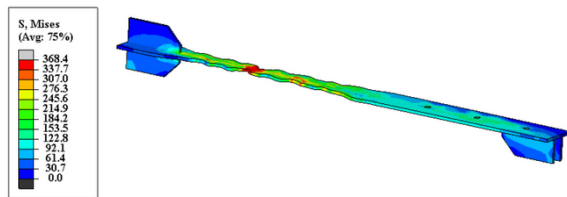
منحنی هیستریزس حاصل از آنالیز اجزا محدود مدل عددی BRB مجهز به الاستومر و بدون آن در شکل (۱۸) نشان داده شده است. باتوجه به نمودار، منحنی در قسمت خطی و الاستیک مشابه یکدیگر هستند. به مرور و تشکیل حلقه‌های هیستریزس، این تغییرات بیشتر شده و در چرخه‌های با جابجایی بیشتر شیب



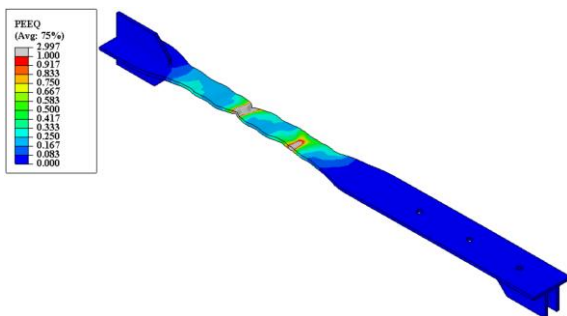
شکل ۱۸- هیستریزس نیرو-جابجایی مدل BRB مجهز به الاستومر (BRB+Elastomer) و BRB بدون الاستومر (BRB)

برای مثال هسته BRB مجهز به الاستومر مطابق شکل (۲۲) دچار خرابی در مود کمانشی شده است. مطابق آن تسلیم اجزا آن در قسمت تسلیم شونده مشخص است. عملکرد صحیح هسته با مود خرابی کمانشی هسته مشهود بوده و توزیع تنش‌ها با فاصله از قسمت تسلیم شونده هسته کاهش می‌یابد. در شکل (۲۳) توزیع کرنش پلاستیک مشخص شده است. با توجه به آن خرابی در محدوده حداکثر تجمع کرنش پلاستیک روی می‌دهد. انتظار می‌رود هسته در آن محدوده دچار گسیختگی و پارگی شود.

بنابراین می‌توان این نکته مدنظر گرفته شود که غلاف به هیچ عنوان تسلیم نشده است و خرابی تماماً در هسته رخ داده است.



شکل ۲۲- توزیع تنش هسته BRB مجهز به الاستومر

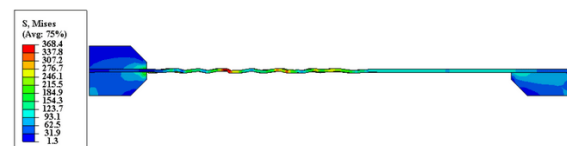


شکل ۲۳- توزیع کرنش پلاستیک هسته BRB مجهز به الاستومر

تعداد کمانش نمونه‌های عددی در شکل (۲۴) نشان داده شده است. بنابراین در نمونه دارای الاستومر ۶ و در نمونه بدون الاستومر ۵ کمانش در هسته مشاهده می‌شود.



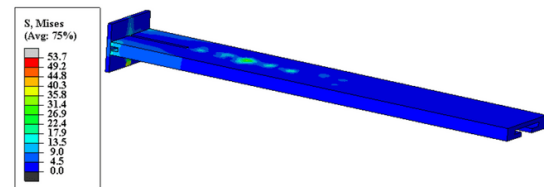
(الف)



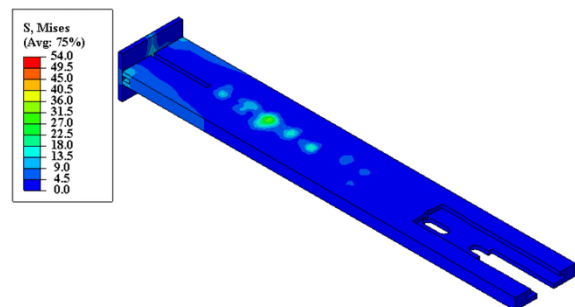
(ب)

شکل ۲۴- مود کمانشی: (الف) BRB بدون الاستومر (ب) BRB مجهز به الاستومر

در مکانی که قسمت تسلیم شونده هسته واقع شده، رخ داده است. در سایر نقاط غلاف تنش محسوسی دیده نشده و تسلیم رخ نداده است. بنابراین تنش‌های واقع در نمونه‌ها تقریباً یکسان هستند. عدم تسلیم در غلاف به خوبی در شکل (۲۱) دیده می‌شود. کرنش پلاستیک به واسطه عدم ورود غلاف به محدوده پلاستیک و تسلیم صفر است.

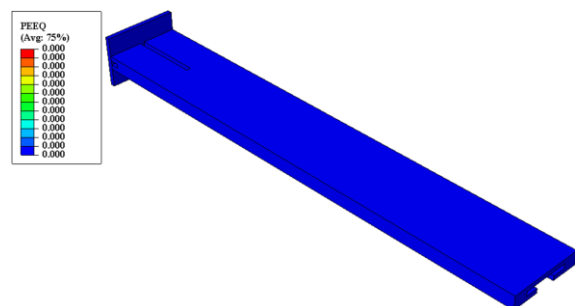


(الف)

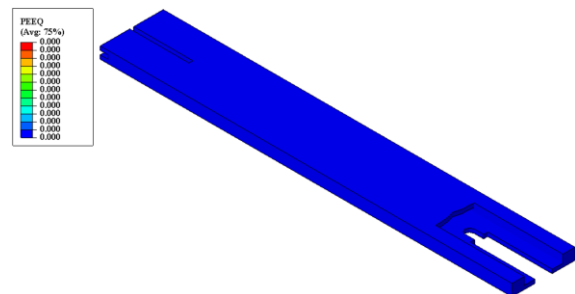


(ب)

شکل ۲۰- توزیع تنش در غلاف: (الف) BRB بدون الاستومر (ب) BRB مجهز به الاستومر



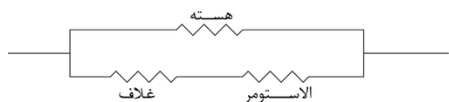
(الف)



(ب)

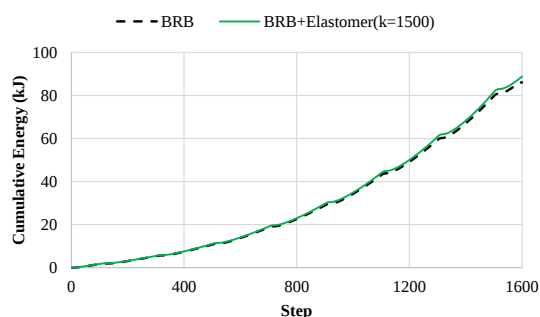
شکل ۲۱- توزیع کرنش پلاستیک در غلاف: (الف) BRB بدون الاستومر (ب) BRB مجهز به الاستومر

قطعه الاستومر عملکرد کاملاً الاستیک دارد. این قطعه از یک سو به هسته فولادی و از سوی دیگر به غلاف متصل است. عملکرد این الاستومر مشابه یک فنر سری متصل به غلاف و مجموع آن به صورت موازی متصل به هسته مطابق شکل (۲۷) است. این روند که با افزایش سختی پس از تسلیم مهاربند، بهبود چشمگیری در عملکرد کلی آن ایجاد می‌کند.



شکل ۲۷- مدل‌سازی رفتاری BRB مجهز به الاستومر به وسیله فنر

مقدار انرژی تجمعی BRB بدون الاستومر و BRB مجهز به الاستومر با سختی ۱۵۰۰ نیوتون بر میلی‌متر در شکل (۲۸) نشان داده شده است. باتوجه به آن با اضافه شدن الاستومر، مقدار انرژی حدود ۳٫۵٪ افزایش داشته است.



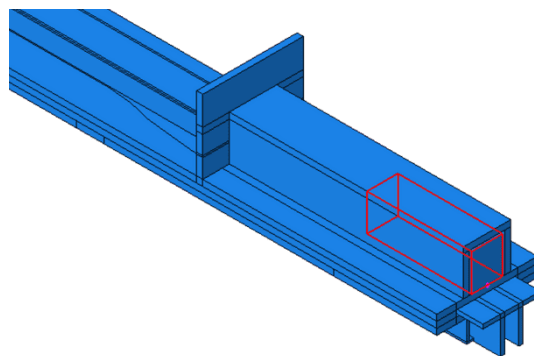
شکل ۲۸- انرژی تجمعی BRB مجهز به الاستومر با سختی ۱۵۰۰ و BRB بدون الاستومر

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک BRB ابداعی مجهز به الاستومر مورد ارزیابی عددی قرار گرفت. این ارزیابی عددی در نرم‌افزار Abaqus انجام شد. پس از مرور ادبیات فنی، اجزا BRB مذکور به‌طور کامل توضیح داده شد. نحوه اتصال الاستومر به غلاف و هسته نیز ارائه شد است. سپس نحوه مدل‌سازی آن با Abaqus بررسی شد. جزئیات مدل‌سازی شامل اجزا، مش‌بندی قطعات، نوع حلگر، مشخصات تماس بین اجزا، مصالح مورد استفاده، قیود مورد نظر و در انتها بارگذاری ارائه شد. پس از آنالیز مدل عددی هیستریزیس نیرو-جابجایی BRB مجهز به الاستومر و بدون آن مورد ارزیابی قرار گرفت. نقاط تسلیم و بحرانی غلاف و هسته از منظر توزیع تنش مورد بحث و بررسی قرار گرفت. همچنین سختی پس از تسلیم در BRB مجهز به الاستومر افزایش داشت. مود خرابی BRB از نوع کم‌انرژی بود. هر دو نمونه به یک تعداد کم‌انرژی در هسته

برای بررسی بیشتر تاثیر الاستومر در BRB مجهز به الاستومر، با فرض کاهش طول آن منحنی هیستریزیس آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

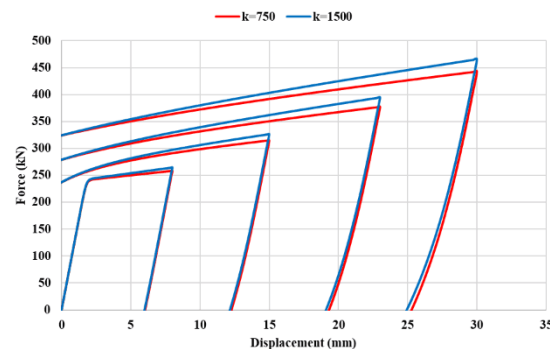
بنابراین طول الاستومر از ۵۱۰ میلی‌متر به ۲۵۵ میلی‌متر تغییر می‌یابد که با این تغییر مقدار سختی آن از ۷۵۰ نیوتون بر میلی‌متر به ۱۵۰۰ نیوتون بر میلی‌متر افزایش می‌یابد. شکل (۲۵) قرارگیری الاستومر جدید در نمونه نمایش داده شده است.



شکل ۲۵- قرارگیری الاستومر با سختی ۱۵۰۰ نیوتون بر میلی‌متر در

بین غلاف و هسته BRB

منحنی هیستریزیس نیرو-جابجایی BRB مجهز به الاستومر با سختی ۷۵۰ و ۱۵۰۰ نیوتون بر میلی‌متر در شکل (۲۶) نشان داده شده است. سختی اولیه یکسان است. سختی پس از تسلیم در نمونه با سختی بیشتر الاستومر افزایش یافته است. این افزایش پس از تسلیم، در چرخه‌های بالاتر به خوبی دیده می‌شود. با ۲ برابر شدن سختی الاستومر در BRB مقاومت افزایش یافته و سختی پس از تسلیم نیز افزایش می‌یابد که خود در کاهش جابجایی پسماند موثر است. افزایش سختی پس از تسلیم در مقایسه دو نمونه حدود ۲۰ درصد است. به این معنا که BRB مجهز به الاستومر با سختی ۱۵۰۰ نیوتون بر میلی‌متر حدود درصد ۱٫۲ برابر سختی پس از تسلیم بیشتری نسبت به BRB مجهز به الاستومر با سختی ۷۵۰ نیوتون بر میلی‌متر را تجربه می‌کند.



شکل ۲۶- نمودار نیرو-جابجایی BRB مجهز به الاستومر با دو سختی ۷۵۰ و ۱۵۰۰ نیوتون بر میلی‌متر

- J. Constr. Steel Res.*, vol. 143, pp. 291–306, 2018.
- [13] L. Di Sarno and G. Manfredi, "Experimental tests on full-scale RC unretrofitted frame and retrofitted with buckling-restrained braces," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 41, no. 2, pp. 315–333, 2012.
- [14] R. S. Ali, S. M. Ebrahim, M. S. Rasoul, and A. Sanaz, "Seismic design of buckling restrained braced frames with reduced core length,"
- [15] M. E. Shemshadian, S. A. Razavi, S. R. Mirghaderi, A. Hosseini, and M. K. Mohammadi, "The advantages of reducing the length of yielding segment in seismic performance of buckling restrained braced frames," in *Sixth International Conference of Seismology and Earthquake Engineering*, 2011, pp. 1–8.
- [16] K. D. Palmer, A. S. Christopoulos, D. E. Lehman, and C. W. Roeder, "Experimental evaluation of cyclically loaded, large-scale, planar and 3-d buckling-restrained braced frames," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 101, pp. 415–425, 2014.
- [17] C. Mahrenholtz, P.-C. Lin, A.-C. Wu, K.-C. Tsai, S.-J. Hwang, R.-Y. Lin, and M. Y. Bhayusukma, "Retrofit of reinforced concrete frames with buckling-restrained braces," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 44, no. 1, pp. 59–78, 2015.
- [18] K.-Y. Pan, A.-C. Wu, K.-C. Tsai, C.-H. Li, and H.-H. Khoo, "Seismic retrofit of reinforced concrete frames using buckling-restrained braces with bearing block load transfer mechanism," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 45, no. 14, pp. 2303–2326, 2016.
- [19] H. Guerrero, T. Ji, J. A. Escobar, and A. Teran-Gilmore, "Effects of buckling-restrained braces on reinforced concrete precast models subjected to shaking table excitation," *Eng. Struct.*, vol. 163, pp. 294–310, 2018.
- [20] H. Guerrero, J. A. Escobar, and A. Teran-Gilmore, "Experimental damping on frame structures equipped with buckling-restrained braces (BRBs) working within their linear-elastic response," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 106, pp. 196–203, 2018.
- [21] C.-C. Chou, C.-H. Hsiao, Z.-B. Chen, P.-T. Chung, and D.-H. Pham, "Seismic loading tests of full-scale two-story steel building frames with self-centering braces and buckling-restrained braces," *Thin-Walled Struct.*, vol. 140, pp. 168–181, 2019.
- [22] C.-C. Chou and S.-Y. Chen, "Subassembly tests and finite element analyses of sandwiched buckling-restrained braces," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 8, pp. 2108–2121, 2010.
- [23] S. A. R. Tabatabaei, S. R. Mirghaderi, and A. Hosseini, "Experimental and numerical developing of reduced length buckling-restrained braces," *Eng. Struct.*, vol. 77, pp. 143–160, 2014.

مشاهده شد. قرار گیری الاستومر در BRB باعث افزایش سختی پس از تسلیم آن می‌شود و از این طریق جابجایی پسماند متناظر نیز کاهش می‌یابد. با مدلسازی مجدد با نسبت سختی ۲ برابری الاستومر نسبت به حالت اولیه، افزایش ۲۰ درصدی سختی پس از تسلیم قابل توجه بود. در انتها با مقایسه مقدار انرژی تجمعی اتلافی مشخص شد که نمونه BRB مجهز به الاستومر با سختی ۱۵۰۰ نیوتون بر میلی‌متر حدود ۳,۵٪ از BRB بدون الاستومر، اتلاف انرژی بیشتری دارد.

از دیگر مزایای BRB مجهز به الاستومر در مقایسه با BRBهای مرسوم، BRB مجهز به الاستومر حتی پس از وقوع زلزله و گسیختگی هسته، به دلیل اتصال الاستومر به غلاف و نواحی ابتدایی یا غیرالاستیک هسته، توانایی حفظ پایداری سازه را داراست.

۵- مراجع

- [1] M. Fujimoto, "A study on the unbonded brace encased in buckling-restrained concrete and steel tube," *J. Str. Eng. AIJ*, vol. 34, 1988.
- [2] T. A. Sabol, "An assessment of seismic design practice of steel structures in the United States since the Northridge earthquake," *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, vol. 13, no. 5, pp. 409–423, 2004.
- [3] P. Clark, I. Aiken, K. Kasai, E. Ko, and I. Kimura, "Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices," in *Proceedings, 68th Annual Convention, Structural Engineers Association of California, Santa Barbara*, 1999.
- [4] R. A. Kersting, L. A. Fahnestock, and W. A. López, "Seismic design of steel buckling-restrained braced frames," *NIST GCR*, pp. 15–917, 2015.
- [5] A. International, "ASTM A36/A36M-19 Standard Specification for Carbon Structural Steel." American Society for Testing and Materials International West Conshohocken~..., 2019.
- [6] M. D'Aniello, G. Della Corte, and F. M. Mazzolani, "Experimental Tests of a Real Building Seismically Retrofitted by Special Buckling-Restrained Braces," in *AIP Conference Proceedings*, 2008, vol. 1020, no. 1, pp. 1513–1520.
- [7] F. M. Mazzolani, G. Della Corte, and M. D'Aniello, "Experimental analysis of steel dissipative bracing systems for seismic upgrading," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 15, no. 1, pp. 7–19, 2009.
- [8] M. E. Erya\csar and C. Topkaya, "An experimental study on steel-encased buckling-restrained brace hysteretic dampers," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 39, no. 5, pp. 561–581, 2010.
- [9] Y. Zhou, H. Shao, Y. Cao, and E. M. Lui, "Application of buckling-restrained braces to earthquake-resistant design of buildings: A review," *Eng. Struct.*, vol. 246, p. 112991, 2021.
- [10] P. Dusicka and J. Tinker, "Global restraint in ultra-lightweight buckling-restrained braces," *J. Compos. Constr.*, vol. 17, no. 1, pp. 139–150, 2013.
- [11] L. Bao, D. Wang, J. Zhou, J. Chen, J. Tong, and D. Lu, "Design and rethinking of mega brace in Tianjin 117 tower," *Prog. Steel Build. Struct.*, vol. 2, pp. 43–48, 2014.
- [12] G. Zhang, P. Chen, Z. Zhao, and J. Wu, "Experimental study on seismic performance of rocking buckling-restrained brace steel frame with liftable column base,"