

چکیده

مهاربند کمانش‌ناپذیر با قابلیت برگشت به موقعیت اولیه که با عنوان SC-BRB شناخته می‌شود، اخیراً به‌منظور طراحی لرزه‌ای سازه‌ها و کنترل خسارت تحت اثر زمین‌لرزه‌های شدید، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. در این نوع مهاربندها، فاز بازگشت توسط تاندون‌های پلیمری تأمین می‌گردد. در این راستا پژوهش حاضر سعی در ارزیابی رفتار این نوع مهاربند و مقایسه آن با قاب خمشی فولادی و قاب مهاربندی‌شده دارد. برای این منظور توسعه مدل عددی بر مبنای مطالعه آزمایشگاهی استوار بوده است. همچنین مقایسه‌ای میان عملکرد قاب خمشی ساده، قاب مهاربندی‌شده، قاب با مهاربندی کمانش‌ناپذیر و قاب مهاربندی‌شده با سیستم SC-BRB انجام شد. در نهایت عملکرد لرزه‌ای قاب به همراه مهاربند SC-BRB صورت پذیرفت. نتایج بیانگر رفتار بسیار مناسب مهاربندهای SC-BRB بوده که استفاده از آن در سازه سبب بالا رفتن بسزای ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سازه شده است. اعمال مهاربند SC-BRB در قاب خمشی سبب شد تا ظرفیت باربری جانبی قاب یک طبقه یک دهانه از ۱۲۴۸ کیلونیوتن با ۲/۸ برابر رشد به ۳۵۷۶ کیلونیوتن افزایش یابد. همچنین مقاومت سازه پنج طبقه با استفاده از مهاربند SC-BRB در دهانه‌های وسط و دهانه‌های جانبی نسبت به قاب خمشی ساده به ترتیب ۲۱ درصد و ۳۸ درصد بیشتر بوده است.

واژگان کلیدی: مهاربند کمانش‌ناپذیر، SC-BRB، تحلیل هیستریزیس، تحلیل لرزه‌ای، روش اجزای محدود.

تحلیل هیستریزیس و لرزه‌ای مهاربندهای کمانش‌ناپذیر خودبازگشتی به همراه تاندون‌های پلیمری در قاب‌های فولادی

سعید قشلاقی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

فریبرز ناطقی الهی (نویسنده مسئول)

استاد، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، nateghi@iiees.ac.ir

۱- مقدمه

کارایی آن پس از زلزله، نیاز به تعمیرات جزئی داشته و یا اصلاً نیاز به تعمیرات نداشته باشد. به‌طور مشخص، بروز تغییر شکل‌های غیرخطی شدید و تغییر شکل پسماند، نمی‌توانند شرایط سازه انعطاف‌پذیر را برآورده کنند. یک راه مؤثر، ایجاد سیستم خودبازگشتی بوده که پس از بروز زلزله، با ایجاد نیروی کششی معکوس، باعث بازگشت سازه به شرایط اولیه می‌شود و می‌تواند کاهش تغییر شکل‌های پسماند و آسیب سازه پس از بروز زلزله را به همراه داشته باشد و باعث افزایش انعطاف سازه و کاهش تعمیرات مورد نیاز در آن گردد.

اولین اقدام برای طراحی یک سیستم خودبازگشتی، استفاده از اتصال پس‌تنیده تیرستون بود. این اتصال‌ها به‌منظور باز و بسته

هدف از طراحی لرزه‌ای مدرن برای سازه‌ها، کاهش تغییر شکل حداکثر اصلی سازه، به‌منظور اطمینان از عدم فروپاشی آن تحت زلزله‌های قوی می‌باشد. این هدف با انتخاب یک سیستم مهار بار جانبی مناسب، از قبیل قاب خمشی یا مهاربندی‌شده تحقق می‌یابد. هرچند در این سازه‌ها، به‌منظور جذب انرژی زلزله، نیاز به ایجاد تغییر شکل‌های غیرخطی بزرگ بوده که می‌توانند باعث آسیب‌های شدید و تغییر شکل‌های پسماند در سازه شده و در نتیجه افزایش مشکلات و هزینه تعمیرات پس از زلزله را به همراه داشته باشند. تحقیقات صورت گرفته در دهه اخیر در زمینه مهندسی زلزله، طرح یک سازه انعطاف‌پذیر را ارائه داده است [۱-۴]؛ یعنی سازه‌ای که به‌منظور بازگرداندن

شدن هنگام بروز زلزله طراحی شده بودند که با استفاده از تاندون‌های پیش‌تیده جانبی، باعث ایجاد نیرویی برای بازگشت به شرایط اولیه سازه می‌شدند [۵-۸].

از میان سیستم‌های مهاربندی متداول، مهاربندهای کمانش‌ناپذیر (BRB)^۲ به علت دارا بودن رفتار هیستریزیس پایدار، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. مهاربندهای BRB معمولاً دارای دو قسمت هستند: یک هسته که نیروی محوری را تحمل کرده و پوسته مهار جانبی به‌منظور جلوگیری از کمانش هسته تحت نیروی فشاری. در هنگام بروز زلزله‌های شدید، هسته به تسلیم رسیده، اما همچنان با جذب انرژی زلزله، باعث کاهش آسیب سازه‌ای می‌شود [۹-۱۳]. هرچند به علت اینکه سختی پس از تسلیم مهاربند نسبتاً کم بوده و توانایی بازگشت به شرایط قبل از تسلیم را ندارد، قاب سازه با خرابی و تغییرشکل‌های پسماند پس از زلزله‌های شدید مواجه می‌شود [۱۱-۱۲، ۱۴-۱۶]. یک راه مؤثر برای این حل مشکل، استفاده از سیستم خودبازگشتی در مهاربندهای معمولی BRB می‌باشد که باعث فراهم نمودن توانایی خودبازگشتی در آنها و کاهش تغییرشکل پسماند سازه می‌شود.

در این راستا ژو و همکاران [۱۷] طرح یک SC-BRB دارای تنها دو پوسته را ارائه کردند: هر دو پوسته به‌عنوان میله‌های فشاری در سیستم خودبازگشتی و همچنین به‌عنوان پوسته‌های مقیدکننده صفحات فولادی جذب‌کننده انرژی هسته مهاربند عمل می‌کردند؛ بنابراین، این کار باعث ساده‌تر شدن و کاهش وزن سازه می‌شد. آنها به‌منظور کاهش تغییرشکل پسماند مهاربندها، از تاندون‌های دارای الیاف پلیمری مقاوم شده با بازالت (BFRP)^۳ استفاده کرده و آزمایش اولیه‌ای بر روی یک نمونه انجام دادند. نتایج نشان داد که سیستم خودبازگشتی به‌خوبی می‌تواند تغییرشکل پسماند مهاربندها را محدود کند. هرچند سیستم خودبازگشتی، به علت لغزش صفحات مهاری دچار مشکل گردیده و باعث متوقف شدن آزمایش شد.

دونگ و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۷ عملکرد مهاربند SC-BRB برای کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های پل با پایه‌های

دو ستونی را مورد بررسی قرار دادند. آنها پس از اعمال مهاربندهای SC-BRB، کاهش قابل توجهی در بیشینه تغییر مکان رخ داده در پل را مشاهده نمودند.

زی و همکاران [۱۹] نیز در سال ۲۰۲۰ اثر استفاده از تاندون‌های پلیمری بازالت بر رفتار هیستریزیس مهاربندهای SC-BRB را تحت یک پژوهش آزمایشگاهی تحلیل نمودند. نتایج نشان‌دهنده‌ی اثر قابل توجه تاندون‌های بازالت بر رفتار مهاربند SC-BRB و بهبود خاصیت خودبازگشتی مهاربند بوده است. همچنین قوسی و ساهو [۲۰] در سال ۲۰۲۰ اثر اعمال مهاربند SC-BRB با مصالح با آلیاژ حافظه‌دار را بر عملکرد قاب ۹ طبقه پنج دهانه را در برابر زلزله‌های گسل نزدیک مورد ارزیابی قرار دادند. طی این تحلیل عددی، کاهش بسزایی تغییر مکان ایجاد شده در قاب در برابر زلزله پس از اعمال مهاربند SC-BRB مشاهده شد.

۲- مبانی نظری طرح SC-BRB

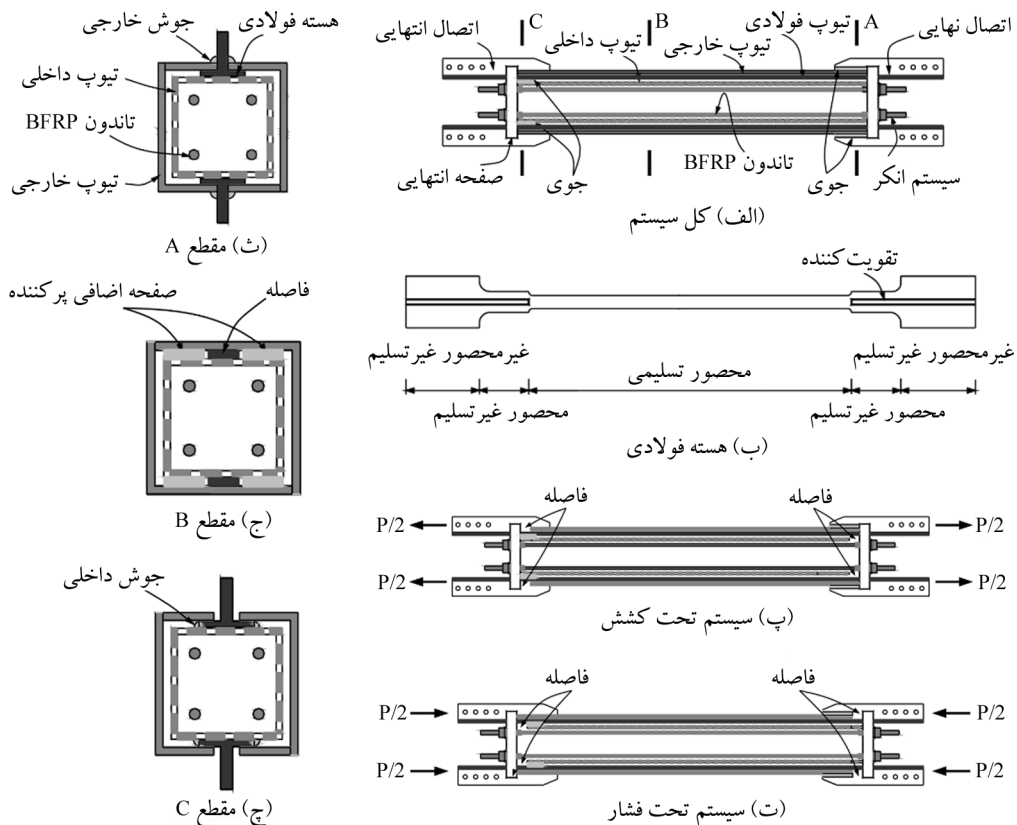
همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، مطالعه حاضر بر مبنای توسعه عددی پژوهش آزمایشگاهی ژو و همکاران [۲۱] استوار است. ایشان در مطالعه مذکور ابتدا یک طرح SC-BRB دو پوسته ارائه نمودند. در مرحله بعد، آزمایش‌های کششی چرخه‌ای بر روی تاندون‌های کامپوزیتی BFRP انجام گرفت. مدول الاستیسیته تاندون‌های کامپوزیتی BFRP اندازه‌گیری شد و قابلیت اطمینان سیستم مهارکننده آنها بررسی گردید. سپس طراحی نمونه‌های SC-BRB دو پوسته انجام گرفت و نمونه‌ها پس از ساخت، برای انجام آزمایش‌های شبه‌استاتیکی آماده شدند. در نهایت، بر اساس نتایج به‌دست آمده، تحلیل مقایسه‌ای بر روی عملکرد هیستریزیس نمونه‌های SC-BRB انجام شد. طراحی SC-BRB دو پوسته بر مبنای استفاده از پوسته‌های فولادی برای تحقق دو هدف اصلی بوده است:

- اول به‌منظور عملکرد به‌عنوان میله‌های فشاری در سیستم خودبازگشتی که با اعمال فشار به صفحات انتهایی باعث ایجاد نیروهای کششی و فشاری در تاندون‌های BFRP شده و

بنابراین ظرفیت خودبازگشتی در مهاربند را فراهم می‌کند؛ دوم استفاده از پوسته‌های فولادی جهت جلوگیری از کمانش صفحات هسته و در نتیجه اطمینان از جذب انرژی بالای سیستم می‌باشد. ترکیب مؤثر این عملکرد در پوسته‌ها باعث عدم نیاز به پوسته اضافی به منظور مهار صفحات هسته که در سیستم SMA-SC-BRB در مطالعه میلر و همکاران [۲۲] مورد نیاز است، بوده است. همچنین ساده‌سازی طراحی مهاربند و کاهش وزن و هزینه‌های ساخت را به دنبال داشته است. به علاوه، تاندون‌های BFRP دارای مدول الاستیسیته پایین و افزایش طول الاستیک بالای استاندارد بوده که آن را تبدیل به مصالحی مناسب برای تاندون‌های خودبازگشتی نموده و همچنین هزینه کمتری نسبت به الیاف آرامید و الیاف کربنی دارد.

شکل (۱) نشان‌دهنده جزئیات سازه‌ای SC-BRB دو پوسته بوده که شامل دو قسمت اصلی می‌باشد: سیستم جذب انرژی مقاوم شده در برابر کمانش و سیستم خودبازگشتی.

سیستم جذب انرژی مقاوم شده در برابر کمانش شامل دو صفحه فولادی موازی در هسته بوده که به وسیله پوسته‌های داخلی و بیرونی در برابر کمانش خارج از صفحه مقاوم شده است. به علت اینکه نسبت عرض به ضخامت صفحات هسته تقریباً کوچک است، از صفحات پرکننده در دو طرف آنها استفاده شده که به پوسته درونی جوش داده شده‌اند و باعث جلوگیری از کمانش صفحات هسته می‌شوند. برای حل مشکل تغییر شکل جانبی ناشی از اثر پواسون در صفحه هسته، فاصله‌ای میان صفحات هسته و پوسته‌های درونی و بیرونی، با ایجاد تفاوت ضخامت بین صفحه هسته و صفحات پرکننده ایجاد شده است (شکل ۱-ج). به منظور اطمینان از اینکه بخش تسلیم نشونده صفحه هسته همواره در ناحیه الاستیک قرار بگیرد، سطح مقطع بخش تسلیم نشونده صفحه هسته کاهش یافته است (شکل ۱-ب) تا آن را به ضعیف‌ترین قسمت مهاربند تبدیل کند. سخت‌کننده‌هایی نیز به منظور افزایش سختی و جلوگیری از کمانش محلی قسمت‌های تسلیم نشونده، جوش داده شده‌اند.



شکل (۱): جزئیات سازه‌ای SC-BRB دو پوسته‌ای [۲۱].

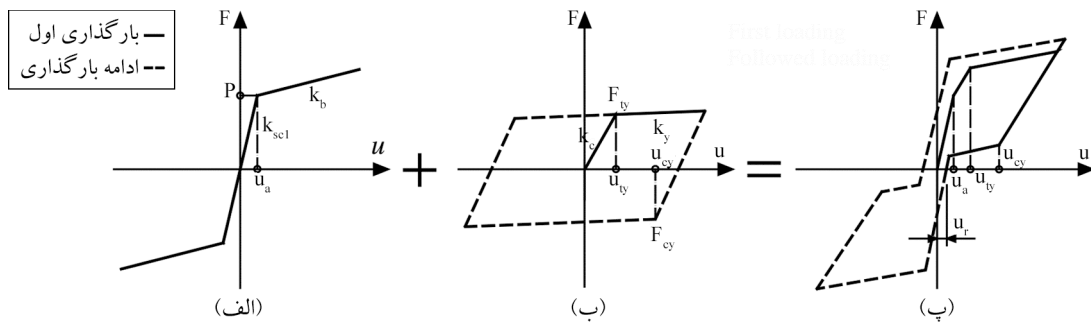
وجود آمدن عملکرد خودبازگشتی را تضمین می‌کند. هنگامی که مهاربند تحت فشار قرار دارد (شکل ۱-ت)، صفحات هسته فشرده می‌شوند (انتهای چپ به سمت راست متمایل شده و انتهای راست نیز به سمت چپ متمایل می‌شود)؛ بنابراین پوسته درونی به همراه انتهای چپ صفحه هسته به سمت راست متمایل شده و باعث ایجاد فشار در صفحه انتهایی می‌گردد. همچنین پوسته بیرونی همراه با انتهای راست صفحه هسته به سمت چپ متمایل شده و باعث ایجاد فشار در صفحه انتهایی سمت چپ می‌شود. همچنین به علت حرکت نسبی بین پوسته‌های درونی و بیرونی، بین صفحات انتهایی سمت راست و پوسته بیرونی و همچنین بین صفحات انتهایی سمت چپ و پوسته درونی جدایی اتفاق افتاده و در نتیجه باعث افزایش فاصله بین صفحات انتهایی و افزایش طول تاندون‌های BFRP شده که باعث رسیدن به مکانیسم خودبازگشتی می‌گردد [۲۱].

هنگامی که مهاربند در پروسه تغییرشکل چرخه‌ای قرار دارد، تغییرشکل‌های پلاستیک چرخه‌ای فشاری و کششی در قسمت‌های مهارشده صفحات هسته اتفاق خواهند افتاد که باعث ایجاد ظرفیت جذب انرژی مناسب در مهاربند می‌شوند.

بر اساس این تحلیل‌ها، SC-BRB دو پوسته می‌تواند به‌طور هم‌زمان به‌عنوان یک سیستم BRB و یک سیستم خودبازگشتی در نظر گرفته شود؛ بنابراین با افزودن منحنی‌های پاسخ هیستریزس این دو سیستم، می‌توان به یک منحنی هیستریزس کلی دست پیدا کرد (شکل ۲). شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) به ترتیب نشان‌دهنده منحنی‌های هیستریزس سیستم خودبازگشتی و سیستم BRB بوده و همچنین شکل (۲-پ) نشان‌دهنده منحنی هیستریزس کلی سیستم SC-BRB دو پوسته می‌باشد.

در شکل (۲-الف) P برابر با نیروی پیش‌تیدگی در تاندون‌های BFRP بوده؛ k_{sc1} سختی اولیه سیستم خودبازگشتی، شامل سختی پوسته درونی، پوسته بیرونی و تاندون‌های BFRP می‌باشد؛ k_b سختی تاندون‌های BFRP است؛ و u_a نیز تغییر مکان فعال‌سازی سیستم خودبازگشتی می‌باشد. در شکل (۲-ب)، k_c و k_y به ترتیب مقادیر سختی الاستیک و سختی پس از تسلیم صفحات هسته هستند؛

سیستم خودبازگشتی، شامل تاندون‌های BFRP دارای افزایش طول الاستیک نسبتاً بالا، پوسته‌های داخلی و بیرونی و صفحات انتهایی می‌باشد. انتهای سمت راست پوسته درونی به سطح صفحه هسته جوش داده شده، درحالی‌که انتهای راست آن آزاد می‌باشد؛ انتهای سمت راست پوسته بیرونی نیز به سخت‌کننده صفحه هسته جوش شده، اما انتهای سمت چپ آن آزاد می‌باشد. بازشوهایی نیز در صفحات انتهایی به‌منظور دسترسی برای اجرای سخت‌کننده‌های صفحه هسته ایجاد شده است. باید ذکر شود که صفحات انتهایی به صفحات هسته و پوسته‌های درونی و بیرونی متصل شده‌اند؛ بنابراین آزادی حرکتی در جهت محوری صفحات هسته برای آنها وجود دارد. تاندون‌های BFRP باید تحت نیروی پیش‌تیدگی قرار گرفته تا از اتصال صلب صفحات انتهایی به انتهای پوسته‌های درونی و بیرونی و فراهم شدن تنش اولیه در پوسته‌های درونی و بیرونی اطمینان حاصل شود. هنگامی که مهاربند تحت نیروی کششی قرار دارد (شکل ۱-پ)، صفحات هسته افزایش طول داده و انتهای سمت چپ به سمت راست و انتهای سمت راست به سمت چپ متمایل می‌شود. به علت اینکه انتهای سمت چپ پوسته درونی به انتهای سمت چپ صفحه هسته جوش داده شده، پوسته درونی همراه با انتهای سمت چپ صفحه هسته، به سمت چپ متمایل شده و باعث اعمال فشار بر صفحه انتهایی سمت چپ می‌شود. همچنین به علت اینکه انتهای راست پوسته بیرونی به انتهای راست صفحه هسته جوش داده شده، پوسته بیرونی همراه با انتهای سمت راست صفحه هسته، به سمت راست متمایل شده و باعث اعمال فشار بر صفحه انتهایی سمت راست می‌شود. به علت حرکت نسبی پوسته‌های درونی و بیرونی، بین صفحه انتهایی سمت راست و پوسته درونی و همچنین صفحه انتهایی سمت چپ و پوسته بیرونی جدایی اتفاق می‌افتد. افزایش فاصله بین پوسته‌ها و صفحات انتهایی، باعث افزایش طول تاندون‌های BFRP شده و این امر، به وجود آمدن یک نیروی انعطاف‌پذیر الاستیک در خلاف جهت تغییرشکل صفحات هسته و ایجاد مکانیسم بازگشت به شرایط اولیه برای مهاربند و نیز به



شکل (۲): نمودار هیستریزیس برای سیستم SC-BRB [۲۱].

از آنجایی که سختی پوسته‌های درونی و بیرونی بسیار زیاد است، تغییر شکل آنها بسیار کم بوده و بنابراین مقدار تغییر مکان فعال‌سازی u_a را در تحلیل تنش مهاربند می‌توان نادیده گرفت. شرایط مورد نیاز برای فعال‌سازی کامل سیستم خودبازگشتی مهاربند این است که نیروی پیش‌تنیدگی اولیه تاندون‌ها باید برابر یا بزرگ‌تر از نیروی تسلیم فشاری صفحات هسته با در نظر گرفتن تأثیر سخت‌شوندگی باشد.

اگر $P \geq \phi \beta F_{cy}$ باشد، هنگام باربرداری، نیروی بازگرداننده حاصل از تاندون‌ها نمی‌تواند بر نیروی تسلیم فشاری مهاربند غلبه کرده و باعث بروز تغییر شکل‌های پسماند بزرگ می‌شود.

پس از شناخت اجزای مهاربند SC-BRB و مبانی نظری رفتار آن، در بخش بعد صحت‌سنجی پاسخ اجزای محدود در مورد این سیستم سازه‌ای صورت داده می‌شود و تحلیل عددی سیستم در قاب فولادی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۳- معرفی و مدل‌سازی مدل مورد بحث در صحت‌سنجی پاسخ اجزای محدود

در مطالعه حاضر از نتایج مطالعه ژو و همکاران [۲۱] در تحلیل سیستم مهاربند کمانش‌ناپذیر خودبازگشتی مقاوم شده توسط الیاف بازالت SC-BRB، به منظور صحت‌سنجی مدل اجزای محدود استفاده شده است و مشخصات مهاربند مذکور به قاب‌های فولادی مورد بحث در این پژوهش تعمیم داده شده است. ژو و همکاران [۲۱]، با اعمال بار رفت و برگشتی بر مهاربند مذکور، پاسخ سازه شامل نمودار هیستریزیس سازه را استخراج نمودند و مورد بررسی قرار دادند که جزئیات آن در

F_{ty} و u_{ty} نیرو و تغییر مکان تسلیم کششی صفحات هسته بوده؛ و F_{cy} و u_{cy} نیرو و تغییر مکان تسلیم فشاری صفحات هسته می‌باشند. در شکل (۲-پ)، u_r برابر با تغییر مکان پسماند مهاربند پس از باربرداری است [۲۱].

هنگامی که مهاربند تحت بارگذاری نیست، پیش‌تنیدگی اولیه P باعث ایجاد نیروهای فشاری P_{in} ، P_{ou} و P_c به ترتیب در پوسته درونی، پوسته بیرونی و صفحات هسته اعمال می‌شود. این مقادیر با سختی محوری هر کدام از اجزا در ارتباط هستند [۲۱].

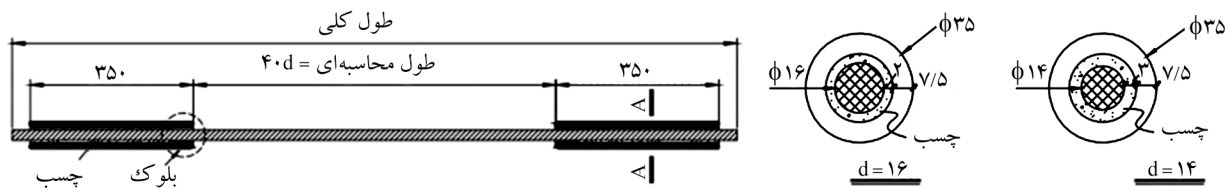
در ابتدای اعمال بار به SC-BRB پوسته‌های درونی و بیرونی، تاندون‌ها و صفحات هسته تا زمان رسیدن بار خارجی به مقدار فراتر از نیروی پیش‌تنیدگی تاندون‌ها، با یکدیگر تغییر شکل می‌دهند. در مرحله بعد، پوسته‌های درونی و بیرونی از صفحات انتهایی جدا شده و سیستم خودبازگشتی فعال می‌شود [۲۱].

در طول پروسه باربرداری، هنگامی که تغییر مکان مهاربند شود کمتر از تغییر مکان تسلیم می‌شود ($u \leq u_{cy}$)، صفحات هسته به تسلیم فشاری می‌رسند. هنگامی که تغییر مکان مهاربند به کمتر از حد تغییر مکان فعال‌سازی سیستم خودبازگشتی برسد ($u \leq u_a$)، پوسته‌های درونی و بیرونی مجدداً با صفحات انتهایی برخورد خواهند کرد. به علت اینکه صفحات هسته تحت نیروی تسلیم فشاری قرار می‌گیرند، مقدار بسیار کمی تغییر شکل پسماند برابر با u_r پس از باربرداری در مهاربندها ایجاد می‌شود.

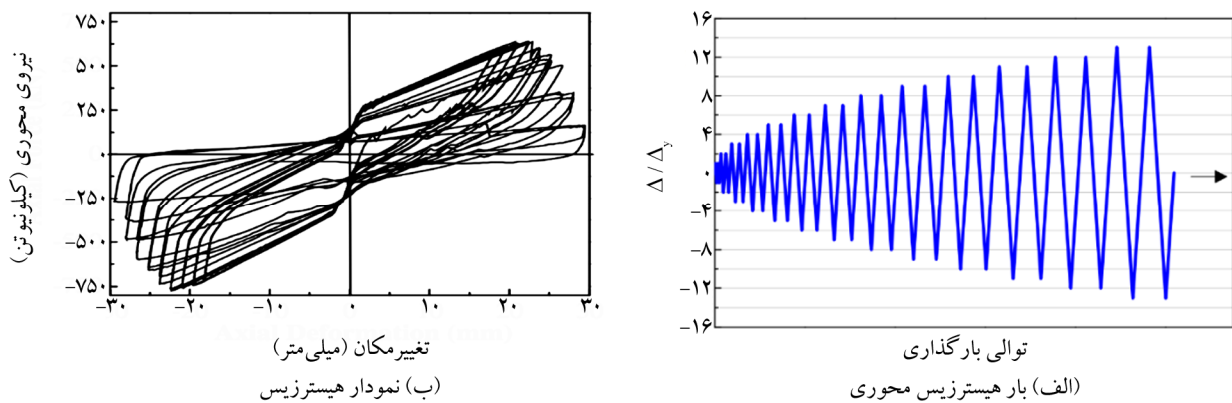
میلر و همکاران [۲۲] بر اساس نتایج آزمایش‌های قبلی، مقادیر $\phi = 1.2$ و $\beta = 1.35$ را پیشنهاد کرده‌اند. تغییر مکان فعال‌سازی u_a برابر تغییر شکل پوسته درونی، پوسته بیرونی، صفحات هسته و تاندون‌های تحت نیروی پیش‌تنیدگی می‌باشد.

برای ایجاد فولاد صفحات و معرفی آن در ناحیه عملکرد خطی و غیرخطی مقدار وزن مخصوص آن برابر با ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب وارد می‌گردد. همچنین مدول الاستیسیته و ضریب پواسون فولاد به ترتیب برابر با ۲۱۰ گیگاپاسکال و ۰/۳۰ می‌باشد. برای معرفی رفتار غیرخطی فولاد نیز مقاومت نهایی فولاد برابر ۴۲۰ مگاپاسکال معرفی می‌شود. مصالح فولاد پر مقاومت میله و مهره اتصال دارای وزن مخصوص و مدول الاستیسیته مشابه با قبل، اما با مقاومت جاری شدن ۵۰۰ مگاپاسکال و مقاومت نهایی ۶۰۰ مگاپاسکال می‌باشد. برای بخش خودبازگشتی مهاربند که توسط الیاف پلیمری بازالت ایجاد شده است نیز یک مصالح جدید با نام BFRP با وزن مخصوص ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول الاستیسیته ۴۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲ و مقاومت نهایی ۲۷۰ مگاپاسکال مطابق با مطالعه ژو و همکاران [۲۱] ایجاد می‌گردد.

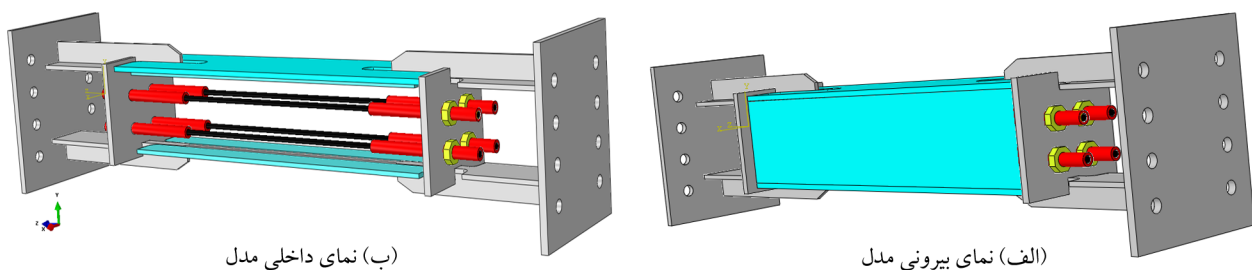
بخش پیشین مورد بررسی قرار داده شد. لذا با استفاده از نتایج به دست آمده از این پژوهش، صحت پاسخ مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار ABAQUS به مرحله آزمون گذارده می‌شود و در ادامه اثر اعمال این مهاربند بر عملکرد قاب فولاد در برابر زلزله‌های گسل دور و نزدیک مورد بحث قرار داده می‌شود. جزئیات هندسی و مشخصات مصالح استفاده شده در مدل‌سازی مهاربند مذکور مطابق با شکل (۱) است. نما و مقطع مهاربند نیز در شکل (۳) نشان داده شده است. نمودارهای تاریخچه زمانی تغییر مکان اجباری اعمال شده به سازه و پاسخ هیستریزس در شکل (۴) ارائه شده است. برای ایجاد مدل معرفی شده با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS، ابتدا نیاز است تا هندسه مدل مورد نظر در نرم‌افزار مطابق با شکل (۵) شبیه‌سازی شود.



شکل (۳): نما و مقطع مهاربند توسط الیاف پلیمری بازالت [۲۱].

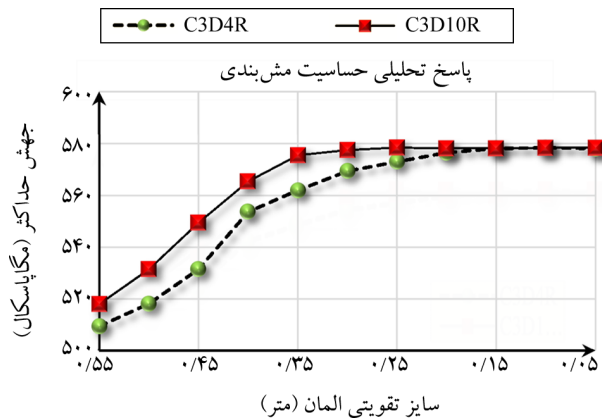


شکل (۴): دامنه بارگذاری و پاسخ هیستریزس مهاربند SC-BRB [۲۱].



شکل (۵): هندسه مدل SC-BRB ایجاد شده در ABAQUS.

به صورت جداگانه رسم شد که در شکل (۶) ارائه شده است. در نرم‌افزار ABAQUS این قابلیت وجود دارد که با وارد نمودن مقدار تقریبی برای ابعاد المان‌ها، مدل به صورت اتوماتیک توسط نرم‌افزار مش‌بندی می‌شود. حال در شکل (۶) مشاهده می‌شود که نرم‌افزار با استفاده از ابعاد تقریبی ۵۵ سانتی‌متر در هر دو نوع تکنیک مش‌بندی مقدار کوچکی برای تنش بیشینه محاسبه نموده است. تنش مهاربند SC-BRB که توسط المان C3D4R به دست آمد، برابر با ۵۰۹/۴ مگاپاسکال بوده است. همچنین این پارامتر پس از استفاده از المان غیرخطی C3D10R برابر با ۵۱۸ مگاپاسکال گزارش شده است که بسیار کوچک‌تر از مقدار ۵۷۵ مگاپاسکال مورد انتظار است. با کاهش ابعاد المان‌های غیرخطی به ۳۰ سانتی‌متر (تعداد المان ۱۸۲۰۵ عدد)، تنش بیشینه به مقدار ۵۷۵ مگاپاسکال گزارش شد و پس از آن کوچک نمودن اندازه المان در مقدار تنش محاسباتی، تغییری ایجاد نکرده است که به این حالت همگرا شدن پاسخ گفته می‌شود.



شکل (۶): پاسخ سیستم در برابر ابعاد و نوع المان.

همچنین برای بخش چسب اپوکسی میان BFRP و محفظه نگه‌دارنده نیز یک مصالح جدید با نام Epoxy و با وزن مخصوص ۱۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲ در ناحیه عملکرد خطی ایجاد می‌شود. سپس هر کدام از مصالح به بخش‌های مورد نظر اختصاص داده می‌شود. بخش بارگذاری در این مدل یکی از مهم‌ترین بخش‌های شبیه‌سازی به شمار می‌رود. برای بارگذاری رفت و برگشتی، از نمودار ارائه‌شده در شکل (۴-الف) استفاده می‌شود. نمودار تاریخچه زمانی بار رفت و برگشتی (هیستریزیس) مذکور بر صفحه انتهایی مهاربند در جهت Z اعمال شد. همچنین عکس‌العمل‌های هر شش جهت در صفحه مقابل نیز به‌عنوان گیردار در نظر گرفته می‌شود.

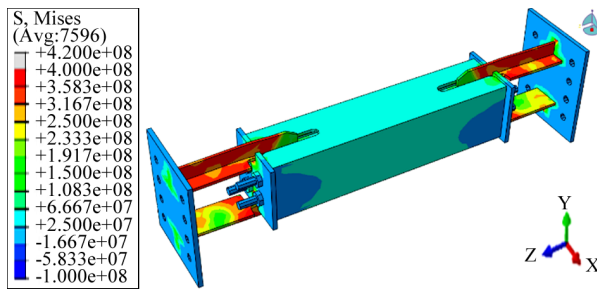
بیشینه تنش ایجاد شده در سازه به‌عنوان معیار مقایسه در آزمون استقلال مش مورد نظر قرار دارد. این آزمون برای دو نوع مختلف مش خطی و غیرخطی سه‌بعدی و یازده مقدار مختلف برای ابعاد تقریبی المان‌ها (از اندازه تقریبی ۵ الی ۵۵ سانتی‌متر با گام ۵ سانتی‌متر) تکرار می‌شود تا نمودار همگرایی مدل حاصل شود.

برای در نظر گرفتن اثر نوع المان، دو نوع مختلف المان با نام‌های C3D8R و C3D4R شبیه‌سازی شدند که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی المان هرمی چهار وجهی سه‌بعدی خطی چهار نقطه‌ای و المان هرمی چهار وجهی سه‌بعدی غیرخطی ۱۰ نقطه‌ای می‌باشند (جدول ۱).

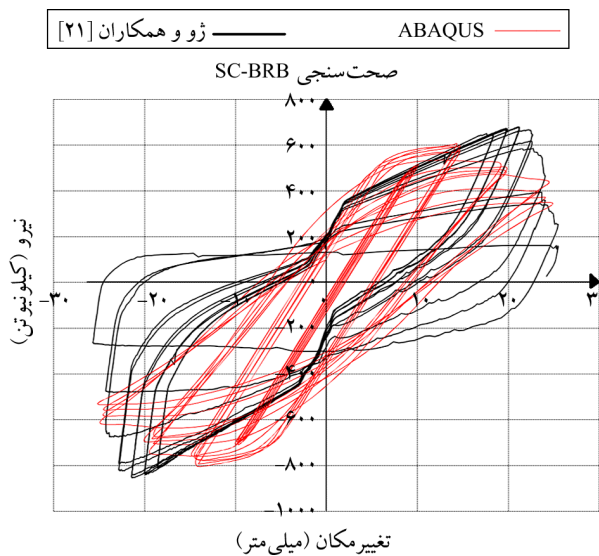
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، به ازای هر کدام از ابعاد و انواع مش‌ها یک بار تحلیل انجام شد و مقدار تنش بیشینه سیستم از نرم‌افزار استخراج شد و در مقابل ابعاد تقریبی برای هر کدام از انواع مش‌ها

جدول (۱): ابعاد تقریبی و تعداد المان‌های به کار رفته در آنالیز حساسیت.

C3D4R				C3D10R				
۰/۳۵	۰/۳۰	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۰۵	ابعاد تقریبی (متر)	
۱۷۷۴۷	۱۸۲۰۵	۱۹۷۷۶	۲۱۶۱۱	۲۵۴۹۰	۴۴۶۶۹	۸۸۱۶۲	تعداد المان	
-				۰/۵۵	۰/۵۰	۰/۴۵	۰/۴۰	ابعاد تقریبی (متر)
				۱۷۱۳۶	۱۷۲۱۳	۱۷۳۲۴	۱۷۷۲۱	تعداد المان



شکل (۸): کانتور تنش مدل مهاربند SC-BRB.

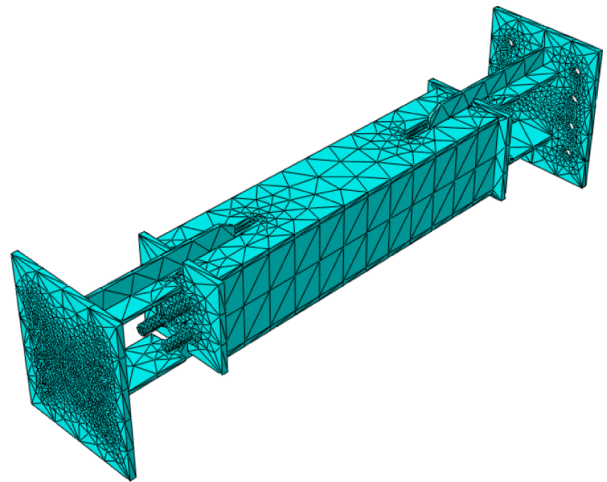


شکل (۹): مقایسه نمودارهای هیستریزس حاصل از پژوهش ژو و همکاران [۲۱] و مدل عددی ABAQUS.

با توجه به نمودارهای هیستریزس شکل (۹) دیده می‌شود که بیشینه تغییر مکان ایجاد شده در مدل آزمایشگاهی ژو و همکاران در سال ۲۰۱۵، به مقدار ۲۴/۹۳ میلی‌متر بوده است. این پارامتر در مدل حاضر که توسط ABAQUS ایجاد شد با ۰/۹۶ درصد اختلاف به مقدار ۲۵/۱۷ کیلو نیوتن برآورد شده است.

میزان بیشینه نیروی ایجاد شده در فاز فشاری مدل مهاربند کماتش‌ناپذیر خودبازگشتی با استفاده از الیاف پلیمری بازالت در پژوهش ژو و همکاران [۲۱]، به مقدار ۸۰۱/۳۲ کیلو نیوتن گزارش شد. این پارامتر در مدل حاضر با ۰/۴ درصد اختلاف به مقدار ۸۰۴/۵۵ کیلو نیوتن به دست آمده است. ظرفیت باربری کششی مدل نیز در مطالعه ژو و همکاران [۲۱] ۵۹۸/۶ کیلو نیوتن بوده که در مدل حاضر با ۰/۶۸ درصد اختلاف ۶۰۲/۷ کیلو نیوتن محاسبه شده است. نتایج حاصل، بیانگر دقت مدل ایجاد شده با استفاده از

از طرفی، پس از استفاده از المان خطی چهار نقطه‌ای با نام C3D4R همگرایی در اندازه تقریبی ۱۰ سانتی‌متر اتفاق افتاده است. تعداد المان‌ها در این اندازه نیز با توجه به جدول فوق برابر با ۴۴۶۶۹ عدد گزارش شده‌اند؛ اما باید توجه نمود که با اینکه تعداد المان‌های به کار رفته در مش‌بندی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر بیشتر از مش‌بندی با ابعاد ۳۰ سانتی‌متر است، اما روش اجزای محدود، معادلات را بر روی نقاط مورد نظر حل می‌نماید. لذا تعداد نقاط ایجاد شده با استفاده از ابعاد ۳۰ سانتی‌متر غیرخطی بسیار بیشتر از تعداد نقاط ابعاد ۱۰ سانتی‌متر خطی می‌باشد. به همین دلیل تحلیل توسط المان‌های غیرخطی زمان بیشتری را می‌طلبد در صورتی که پاسخ‌های به دست آمده یکی هستند. لذا در مطالعه حاضر برای مش‌بندی سیستم از المان خطی چهار نقطه‌ای با ابعاد تقریبی ۱۰ سانتی‌متر استفاده می‌شود که در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۷): مش‌بندی بهینه سیستم توسط المان C3D4R با ابعاد تقریبی ۱۰ سانتی‌متر.

در نهایت، پس از تحلیل سیستم در ماژول Job می‌توان نتایج به دست آمده از آنالیز را در ماژول Visualization مشاهده نمود که در شکل (۸) کانتور رنگی تنش مهاربند ارائه شده‌اند. نمودار هیستریزس به دست آمده از تحلیل مدل توسط نرم‌افزار ABAQUS در این پژوهش در مقایسه با نمودار تاریخچه زمانی هیستریزس مطالعه ژو و همکاران [۲۱] نیز در شکل (۹) نشان داده شده است.

مهاربند کمانش‌ناپذیر خودبازگشتی نیز مطابق با فصل پیشین، نام SC-BRB انتخاب می‌شود.

جزئیات قاب‌های مذکور در شکل (۱۰) نشان داده شده‌اند. مدل‌سازی و مش‌بندی مدل‌های فوق در ABAQUS نیز مطابق با بخش صحت‌سنجی توسعه داده می‌شود. مدل مش‌بندی شده، کانتور تنش و نمودارهای هیستریزیس این مدل‌ها در شکل (۱۱) ارائه شده‌اند. در نمودارهای هیستریزیس بیشینه ظرفیت باربری قاب در هر مدل به‌عنوان معیار مقایسه عملکرد مدل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

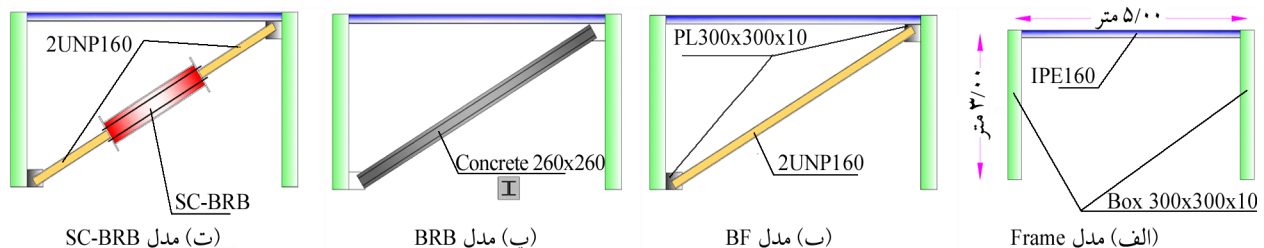
در شکل (۱۱) و در بخش مربوط به نمودارهای هیستریزیس، بیشینه مقدار ظرفیت باربری هر سیستم بر روی نمودارهای مربوطه درج شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، ظرفیت باربری مدل قاب بدون مهاربند برابر با ۱۲۴۸ کیلونیوتن، مدل قاب و مهاربند ساده ۲۷۹۳ کیلونیوتن، مدل قاب و مهاربند کمانش‌ناپذیر ۳۰۶۰ کیلونیوتن و مدل قاب به همراه مهاربند SC-BRB برابر با ۳۵۷۶ بوده است. بیشترین ظرفیت باربری همان‌طور که مشاهده می‌شود مربوط به مدل قاب به همراه مهاربند کمانش‌ناپذیر خودبازگشتی بوده است.

به ادامه این روند و با تحلیل پوش‌اور مدل‌ها تحت بارگذاری یک‌طرفه مدل‌ها، نمودارهای پوش‌اور هر مدل در شکل (۱۲) ارائه شده است. افزایش ظرفیت باربری سازه پس از استفاده از مهاربند SC-BRB نسبت به سایر سیستم‌های مقاوم‌سازی در نمودارهای پوش‌اور فوق مشهود است. برای در دست داشتن دید بهتری از این مقادیر، ظرفیت باربری هر مدل به همراه نام مدل در نمودار میله‌ای شکل (۱۳) ارائه شده است. دیده می‌شود که استفاده از مهاربند SC-BRB ظرفیت باربری سیستم را نسبت به مدل قاب ساده ۱۸۶ درصد، نسبت به مدل قاب و مهاربند ساده ۲۸ درصد و نسبت به مدل قاب و مهاربند کمانش‌ناپذیر ۱۷ درصد بهبود داده است.

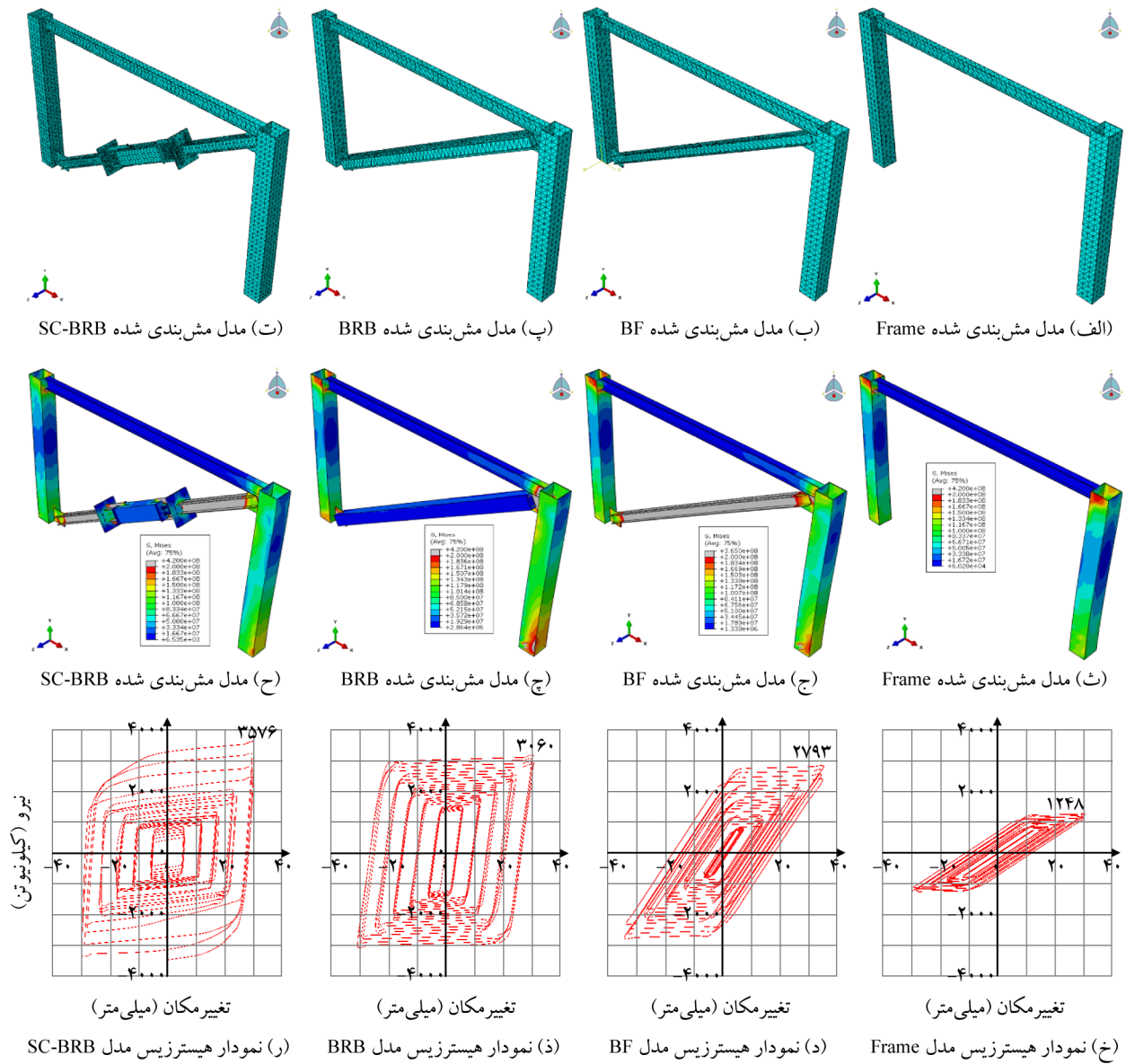
ABAQUS بوده و لذا می‌توان با توسعه این مدل، اثرسنجی آن را در قاب فولادی مورد ارزیابی قرار داد. در ادامه پژوهش حاضر قصد بر آن است تا ابتدا یک قاب فولادی یک طبقه یک دهانه در ABAQUS ایجاد شود. سپس حالات مختلف قاب خمشی ساده، قاب به همراه مهاربند قطری ساده، قاب به همراه مهاربند قطری کمانش‌ناپذیر و قاب به همراه مهاربند کمانش‌ناپذیر خودبازگشتی با الیاف بازالت تحت بار هیستریزیس قرار داده شده و تحلیل پوش‌اور برای آنها انجام شود. سپس یک سازه پنج طبقه چهار دهانه با استفاده از ETABS طراحی شود و یک قاب از آن در ABAQUS شبیه‌سازی گردد و رفتار آن در حالات با و بدون مهاربند SC-BRB در برابر شتاب دور از گسل و نزدیک به گسل زلزله مورد ارزیابی قرار داده شود.

۴- تحلیل پوش‌اور قاب یک طبقه یک دهانه

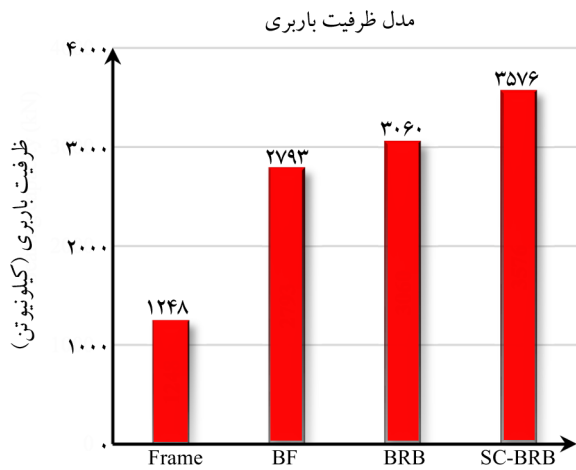
در این بخش همان‌طور که ذکر شد، یک قاب یک طبقه یک دهانه در ABAQUS شبیه‌سازی شده و تحت چهار حالت مختلف تحلیل هیستریزیس و پوش‌اور انجام می‌شود. لازم به ذکر است که تحلیل پوش‌اور را می‌توان تحت بارگذاری مونوتونیک و به صورت یک‌طرفه نیز انجام داد؛ اما به دلیل پیچیدگی مدل حاضر، این تحلیل توسط بار رفت و برگشتی انجام می‌شود تا بارگذاری به صورت آهسته بر مدل وارد شود و افزایش یابد تا از بروز پیام‌های خطا در ABAQUS جلوگیری شود. نام گذاری مدل‌ها در این بخش به این صورت است که برای مدل قاب خمشی، نام Frame، برای مدل قاب خمشی و مهاربند معمولی نام BF (مخفف Braced Frame)، برای مدل با مهاربند کمانش‌ناپذیر نام BRB (مخفف Buckling Resistance Brace) و برای مدل با



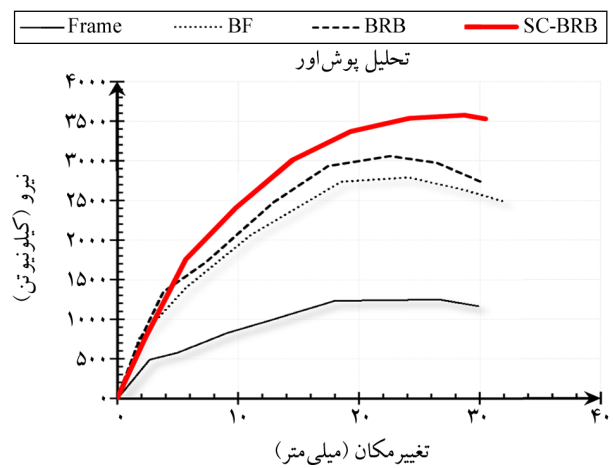
شکل (۱۰): جزئیات هندسی قاب‌های یک دهانه یک طبقه.



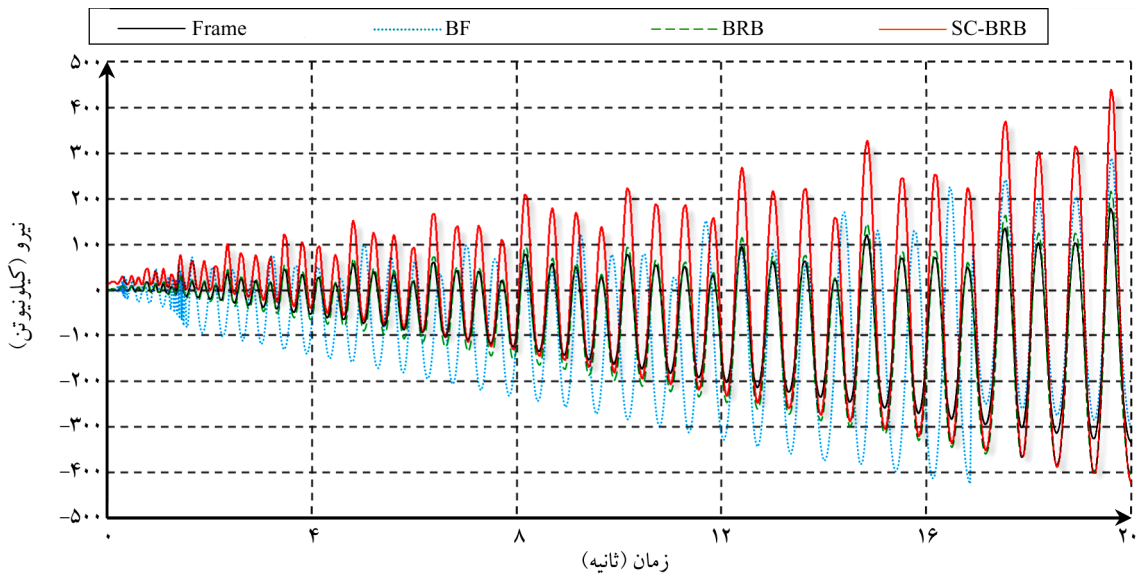
شکل (۱۱): مدل مش بندی شده، کانتور تنش و نمودارهای هیستریزیس قابهای یک دهانه یک طبقه.



شکل (۱۳): پیشینه مقادیر ظرفیت باربری مدل ها.

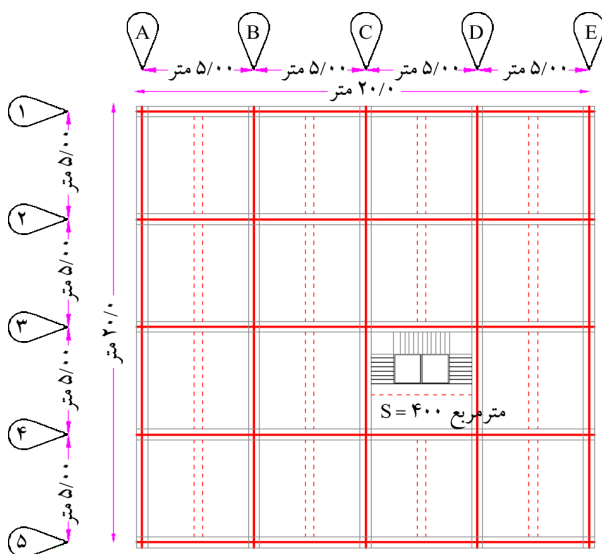


شکل (۱۲): نمودارهای حاصل از تحلیل پوش اور مدل ها.



شکل (۱۴): نمودار تاریخچه زمانی جذب انرژی مدل‌ها.

به صورت سه بعدی در نرم افزار ETABS آنالیز و طراحی می‌شود. مدل مطابق با شکل (۱۵) دارای چهار دهانه ۵ متری در هر جهت است. همچنین با توجه به شکل مذکور پلان سازه منظم و اتصالات تیرها به صورت گیردار در نظر گرفته شده است. ارتفاع کلیه طبقات مطابق با شکل (۱۶) برابر با ۳ متر اختیار شده‌اند. در ETABS تنها مدل قاب خمشی طراحی می‌شود و اثر اعمال نمودن مهاربند توسط نرم افزار ABAQUS در مدل بررسی خواهد شد. بارگذاری سازه بر اساس آیین نامه مبحث ششم صورت پذیرفته و طراحی بر اساس آیین نامه مبحث دهم انجام شده است.



شکل (۱۵): پلان سازه مورد بحث.

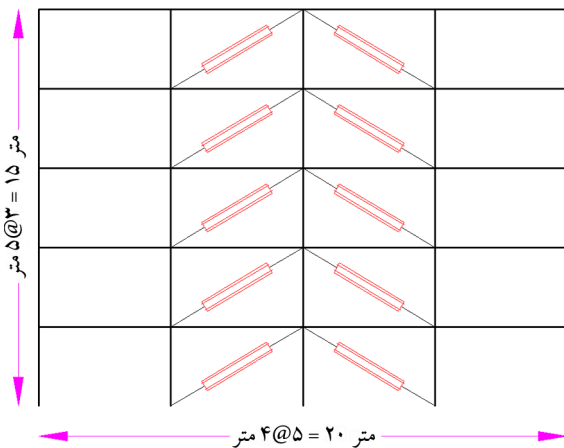
در نمودار تاریخچه زمانی جذب انرژی چهار مدل اولیه نیز دیده می‌شود که بیشینه مقدار انرژی جذب شده در قاب بدون مهاربند به میزان ۱۷۸ کیلوژول رسیده است. نصب مهاربند ساده و مهاربند کمانش‌ناپذیر نیز سبب شد تا این میزان جذب انرژی به ترتیب به مقدار ۲۱۶ و ۲۸۸ کیلوژول صعود نماید. در نهایت استفاده از مهاربند کمانش‌ناپذیر خودبازگشتی سبب شد تا انرژی بیشینه جذب شده در سازه با ۱۴۶ درصد رشد نسبت به مدل قاب بدون میراگر، به ۴۳۸ کیلوژول برسد (شکل ۱۴).

در ادامه قصد بر آن است تا یک سازه ۵ طبقه چهار دهانه در ETABS طراحی شود و یک قاب از این سازه در ABAQUS شبیه‌سازی گردد. همچنین در ادامه، قاب مورد نظر به مهاربند SC-BRB مجهز شده و تحت بارهای لرزه‌ای قرار می‌گیرد.

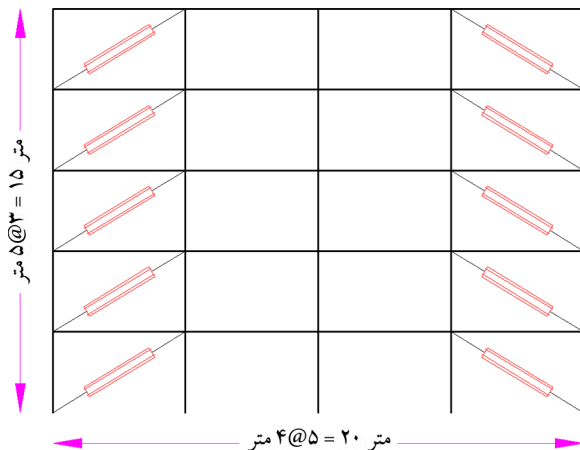
۵- طراحی و شرح مدل‌ها

تحلیل لرزه‌ای زیرمجموعه‌ای از تحلیل سازه‌ها و به طور کلی محاسبه پاسخ یک سازه ساختمانی (یا سازه‌های غیر ساختمانی مانند پل و...) در برابر زمین لرزه است. این بخشی از روند طراحی سازه، مهندسی زلزله یا ارزیابی و مقاوم‌سازی سازه‌هایی است که در مناطق زلزله خیز باید احداث گردند. لذا تحلیل دقیق و منطبق بر شرایط آیین‌نامه‌های معتبر جهانی ضرورت است. در این بخش مدل ۵ طبقه

اکنون قصد بر آن است تا مدل طرح شده در ABAQUS شبیه‌سازی شود و سپس در دو حالت مختلف چیدمان، به مهاربند SC-BRB تجهیز گردد. موقعیت مهاربندها در دو حالت مختلف در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) مشهود هستند. در این بخش نیز برای نام‌گذاری مدل‌ها، برای مدل قاب خمشی ساده نام Frame، برای مدل قاب به همراه مهاربند SC-BRB حالت اول نام SC-BRB-1 و برای حالت دوم نیز نام SC-BRB-2 انتخاب شده است.



شکل (۱۹): قاب مورد نظر در مدل SC-BRB-1.

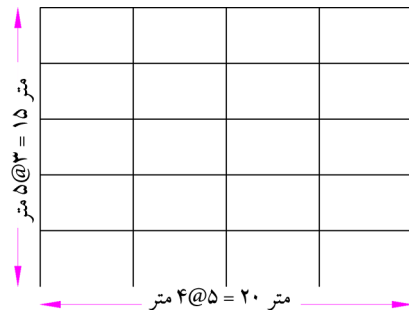


شکل (۲۰): قاب مورد نظر در مدل SC-BRB-2.

۶- معرفی زمین لرزه‌های مورد بررسی

برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، شناخت جنبش و ارتعاشات شدید صفحه زمین زیرساخت سازه که انتظار می‌رود در طول عمر مفید سازه رخ دهد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بهترین راه برای شناخت ویژگی‌های جنبش شدید زمین بستر سازه،

مقاطع سازه پس از طراحی در شکل (۱۷) و نسبت نیروی وارده به نیروی مقاوم سازه نیز در شکل (۱۸) نشان داده شده‌اند. به علت محدودیت حجم مقاله از بیان دیگر جزئیات طراحی صرف نظر می‌شود و تنها به ارائه نتایج طراحی شامل مقاطع اعضای تیر و ستون سازه اکتفا شده است.



شکل (۱۶): ابعاد هندسی قاب سازه مورد بحث در نما.

ستون	سقف	HE160A	HE160A	HE160A	HE160A	HE160A
BOX300	HE200A	BOX300	HE200A	BOX300	HE200A	BOX300
BOX400	HE200A	BOX400	HE200A	BOX400	HE200A	BOX400
BOX400	HE200A	BOX400	HE200A	BOX400	HE200A	BOX400
BOX500	HE300A	BOX500	HE300A	BOX500	HE300A	BOX500
BOX500	HE300A	BOX500	HE300A	BOX500	HE300A	BOX500
BOX500	پایه	BOX500	پایه	BOX500	پایه	BOX500

شکل (۱۷): قاب و مقاطع سازه مدل ۵ طبقه.

ستون	سقف	۰/۳۸۴	۰/۳۶۹	۰/۳۶۹	۰/۳۸۴	۰/۳۸۴
۰/۱۵۴	۰/۲۹۳	۰/۴۶۱	۰/۴۵۰	۰/۴۵۰	۰/۴۶۱	۰/۱۲۷
۰/۳۸۴	۰/۱۸۲	۰/۴۲۱	۰/۴۱۶	۰/۴۱۶	۰/۴۲۱	۰/۳۳۰
۰/۳۳۰	۰/۲۹۳	۰/۳۴۲	۰/۳۲۷	۰/۳۲۷	۰/۳۴۲	۰/۱۴۰
۰/۱۴۰	۰/۱۸۵	۰/۲۲۳	۰/۲۱۷	۰/۲۱۷	۰/۲۲۳	۰/۲۰۲
۰/۲۰۲	۰/۲۹۳	۰/۲۲۴	۰/۲۲۳	۰/۲۲۳	۰/۲۲۳	۰/۲۰۲
۰/۲۰۲	۰/۱۰۰	۰/۵۰	۰/۷۰	۰/۹۰	۰/۹۵	۰/۱۰۰

شکل (۱۸): کانتور نوخ تنش قاب در ETABS.

برابر با زمین‌لرزه‌های مختلف تحلیل می‌گردد.

۷- نتایج و بحث

یک قاب از هر کدام از سه مدل مورد نظر، شامل قاب خمشی با نام Frame، قاب به همراه مهاربند کمانش‌ناپذیر خودبازگشتی با تاندون‌های پلیمری در حالات اول و دوم به ترتیب با نام‌های SC-BRB-1 و SC-BRB-2 در ABAQUS ایجاد شدند. گام‌های حل مسئله شامل تحلیل استاتیکی^۵ برای محاسبه نیروهای ثقلی و تحلیل دینامیکی ضمنی^۶ برای محاسبه پاسخ لرزه‌ای معرفی شدند. در گام اول به منظور انجام تحلیل استاتیکی، شرایط مرزی برای پای ستون‌ها به صورت گیردار در نظر گرفته شد و از حرکت عمود بر صفحه در نقاط اتصال تیر و ستون، جلوگیری به عمل آمد. نیروهای ثقلی شامل بار مرده و زنده طبقات به تیرها وارد شد. علاوه بر آن، نیروی جاذبه نیز به کل مدل اعمال شد. در گام مربوط به تحلیل دینامیکی نیز، با ثابت نگه داشتن نیروهای وارده، درجه آزادی ستون‌ها در جهت افقی آزاد شد و شتاب زلزله‌ها با ضریب ۹/۸۱ به انتهای تحتانی ستون‌ها اعمال شدند. در ادامه نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها در برابر زلزله‌های مورد بحث ارائه می‌شوند.

۷-۱- نتایج تحلیل لرزه‌ای قاب‌ها

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل قاب ۵ طبقه که توسط مهاربند کمانش‌ناپذیر خودبازگشتی در دو حالت مختلف مقاومت‌سازی شده است، در مقابل زمین‌لرزه‌های گسل دور و نزدیک لندرز و نورث‌ریج ارائه شده است.

به دست آوردن نمودار حرکت زمین از جمله شدت و بزرگی شتاب زمین در هنگام رویداد زمین‌لرزه‌های متوسط تا بزرگ می‌باشد. این امر به وسیله دستگاه شتاب‌نگار موجود در محل و رخداد زمین‌لرزه در گستره نزدیک میسر می‌شود. با توجه به اینکه برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله در مناطق لرزه‌خیز، نمی‌توان برای هر محل دستگاه شتاب‌نگار مستقر نمود و در انتظار رویداد زمین‌لرزه‌ای در حوزه نزدیک به آن باقی ماند تا نسبت به ثبت نمودار ارتعاشات و رکوردی مناسب از انرژی سینتیک و جنبشی زمین اقدام نمود، لکن امروزه در مناطق لرزه‌خیز جهان نسبت به استقرار شبکه‌های شتاب‌نگار و لرزه‌نگاری اقدام می‌گردد تا پس از ثبت رکورد ارتعاشات نیرومند زمین از تعداد زیادی زمین‌لرزه‌ها در گستره این شبکه‌ها بتوانند با پژوهش‌های متعدد به نتایجی دست یابند که منتج به تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی لرزه‌ای شود و پارامترهای ارتعاشات زمین‌های زیرساخت را بتوان بر پایه این نقشه‌ها پیش‌بینی و برای بارگذاری شتاب زمین‌لرزه بر روی سازه‌های مذکور از آنها بهره گرفت.

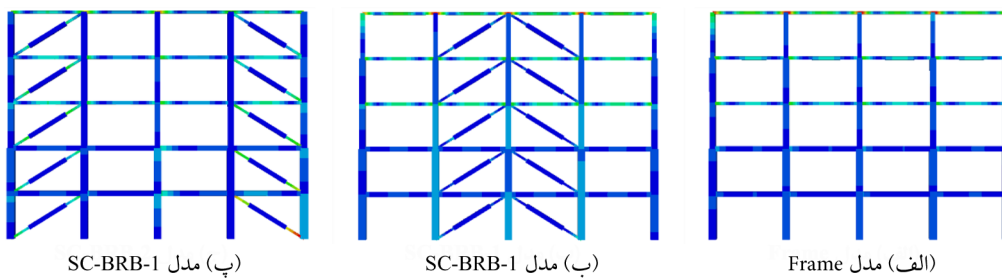
برای انجام تحلیل دینامیکی و انتخاب و اعمال شتاب زمین‌لرزه در مدل، دو زمین‌لرزه لندرز و نورث‌ریج با ماهیت‌های نزدیک به گسل و دور از گسل انتخاب شد و به سیستم قاب به همراه مهاربند SC-BRB در دو حالت قرارگیری مهاربندها به صورت نمودار تاریخچه زمانی شتاب اعمال می‌شوند. برای نام‌گذاری مدل‌ها با توجه به نوع بارگذاری و شتاب زلزله، ابتدا از حرف N نشان‌دهنده‌ی نزدیک (Near) و F مخفف دور (Far) بودن گسل استفاده شده است. پس از آن نیز برای ایجاد ایجاز، از کد ثبت رویداد زلزله (RSN)^۴ استفاده شده است (جدول ۲). در ادامه، رفتارسنجی قاب طرح‌شده با و بدون مهاربند در

جدول (۲): مشخصات زمین‌لرزه‌های مورد استفاده در مطالعه حاضر.

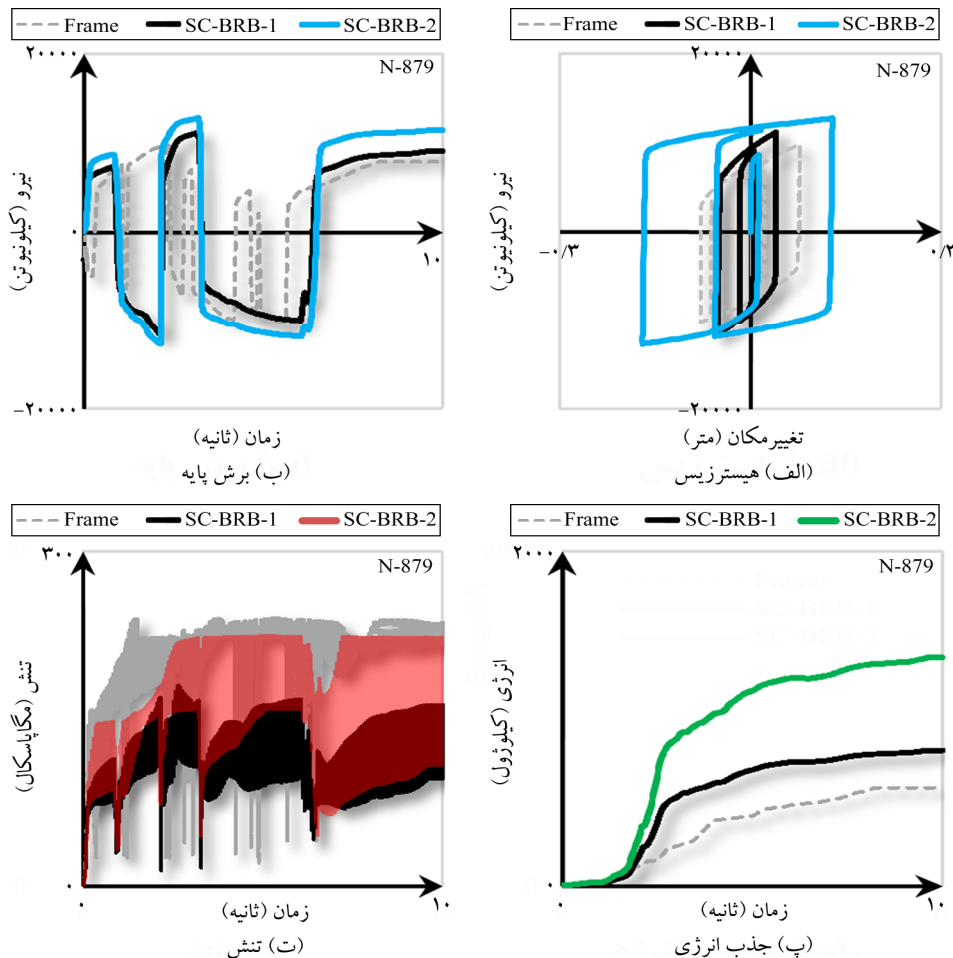
#NO		1	2	3	4	
Year		1992	1994	1992	1994	
Eartquake		Landers	Northridge	Landers	Northridge	
Fault Type		Strike Slip	Reverse	Strike Slip	Reverse	
Magnitude		7.28	6.69	7.28	6.69	
RSN		879	987	838	973	
Station		Lucerne	LA-Centinela St	Barstow	Garden Grove-Santa Rita	
PGA (g)	Near Fault Earthquakes	0.70	0.47	0.13	0.10	
PGV (cm/s)		97.56	20.42	17.48	8.34	
PGD (cm)		70.50	3.73	14.92	2.22	
PGV/PGA		139.37	43.44	134.46	83.4	
PGD/PGV		0.72	0.18	0.85	0.26	
		Far Fault Earthquakes				

کانتورهای تنش حاصل از تحلیل سه مدل ارائه شده‌اند. در ادامه نتایج حاصل از تحلیل هر مدل در برابر زلزله‌های مختلف بیان می‌شوند. نتایج در هر شکل شامل چهار نمودار هیستریزیس، برش پایه، جذب انرژی و تنش هستند. در هر نمودار، برای در دست داشتن معیار مقایسه، پاسخ هر سه قاب به صورت یکجا ارائه شده است. نتایج حاصل از تحلیل قاب‌ها در برابر زلزله گسل نزدیک لندرز در شکل (۲۲) ارائه شده است. با توجه به نمودارهای این شکل دیده می‌شود که ظرفیت باربری مدل قاب بدون مهاربند،

نام‌گذاری نمودارها مطابق با موارد فوق می‌باشد، به این صورت که ابتدا نام زلزله شامل Lan (مخفف Landers) و Nor (مخفف Northridge) ارائه می‌شود. سپس در نهایت از حرف N نشان‌دهنده‌ی شتاب گسل نزدیک (Near) و F مخفف شتاب زلزله گسل دور (Far) استفاده شده است. سه مدل Frame شامل قاب بدون مهاربند، SC-BRB-1 شامل قاب با مهاربند در دهانه‌های میانی و مدل SC-BRB-2 شامل قاب با مهاربند در دهانه‌های کناری در این بخش مورد ارزیابی قرار داده می‌شوند. در شکل (۲۱)



شکل (۲۱): کانتور تنش مدل‌ها در تحلیل استاتیکی.



شکل (۲۲): نتایج حاصل از تحلیل قاب‌ها در برابر زلزله گسل نزدیک لندرز.

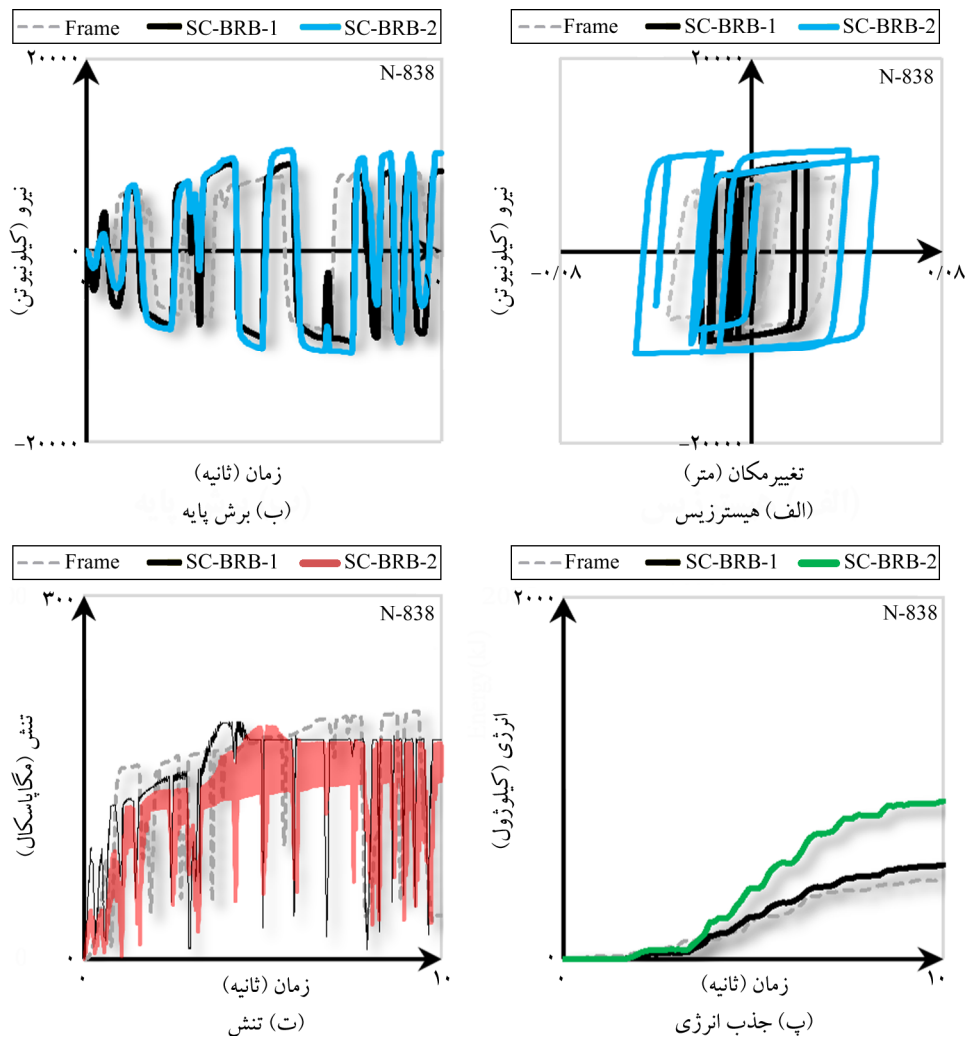
تنش ایجاد شده در این زلزله نیز در اثر استفاده از مدل دوم مهاربند کمانش‌ناپذیر خودبازگشتی، به کمترین مقدار خود رسیده است.

نتایج حاصل از تحلیل قاب‌ها در برابر زلزله گسل نزدیک نورث‌ریج در شکل (۲۴) ارائه شده است. با توجه به نمودارهای این شکل دیده می‌شود که ظرفیت باربری مدل قاب بدون مهاربند، قاب با مهاربند مدل اول و مدل دوم به ترتیب برابر با ۱۰۲۲۰، ۱۲۹۶۸ و ۱۵۲۳۱ کیلونیوتن بوده است. جذب انرژی در این مدل‌ها نیز به ترتیب دارای مقادیر ۴۲۰، ۵۲۳ و ۱۰۲۱ کیلوژول می‌باشد. تنش ایجاد شده در این زلزله نیز در اثر استفاده از مدل دوم مهاربند کمانش‌ناپذیر خودبازگشتی، به کمترین مقدار خود رسیده است.

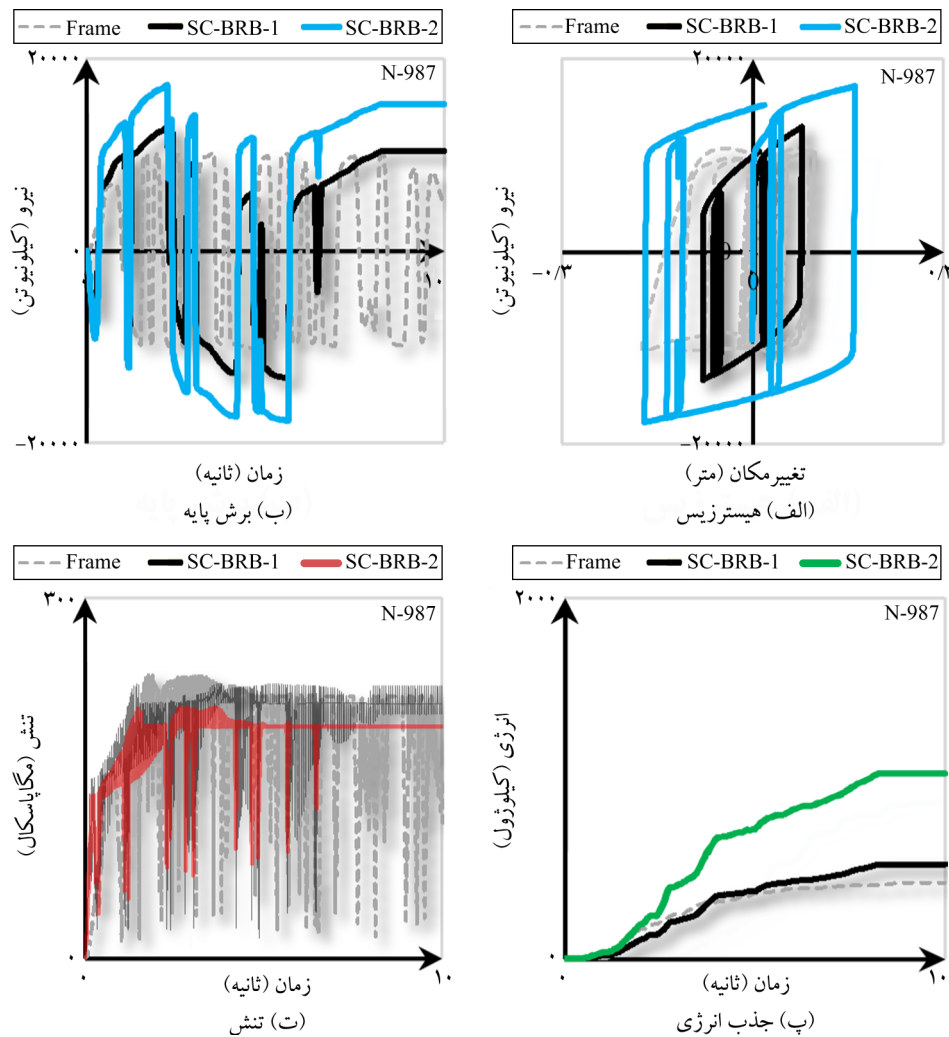
قاب با مهاربند مدل اول و مدل دوم به ترتیب برابر با ۹۹۰۴، ۱۱۲۲۹ و ۱۲۷۳۸ کیلونیوتن بوده است.

جذب انرژی در این مدل‌ها نیز به ترتیب دارای مقادیر ۵۸۵، ۸۰۶ و ۱۳۵۸ کیلوژول می‌باشد. تنش ایجاد شده در این زلزله نیز در اثر استفاده از مدل دوم مهاربند کمانش‌ناپذیر خودبازگشتی، به کمترین مقدار خود رسیده است.

نتایج حاصل از تحلیل قاب‌ها در برابر زلزله گسل دور لندرز در شکل (۲۳) ارائه شده است. با توجه به نمودارهای این شکل دیده می‌شود که ظرفیت باربری مدل قاب بدون مهاربند، قاب با مهاربند مدل اول و مدل دوم به ترتیب برابر با ۸۰۵۳، ۹۱۳۴ و ۱۰۴۷۱ کیلونیوتن بوده است. جذب انرژی در این مدل‌ها نیز به ترتیب دارای مقادیر ۴۳۸، ۵۱۸ و ۸۷۳ کیلوژول می‌باشد.



شکل (۲۳): نتایج حاصل از تحلیل قاب‌ها در برابر زلزله گسل دور لندرز.



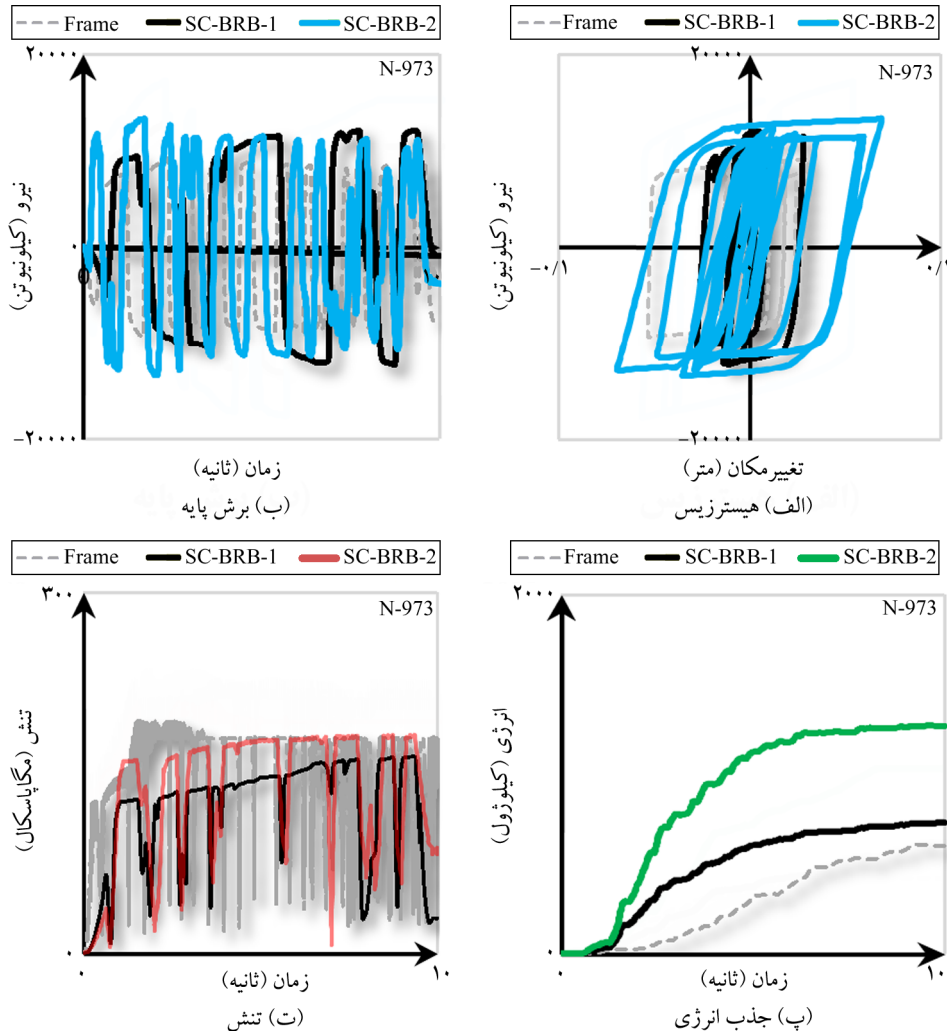
شکل (۲۴): نتایج حاصل از تحلیل قاب‌ها در برابر زلزله گسل نزدیک نورث‌ریج.

دوم مهاربندی به‌وضوح در نمودار فوق قابل‌رؤیت است. دیده می‌شود که تحت هر چهار زلزله اعمالی، ظرفیت باربری بعد از استفاده از مدل SC-BRB-2 افزایش چشمگیری نسبت به مدل قاب بدون مهاربند داشته است. پاسخ قاب با مهاربندی مدل SC-BRB-1 در حد واسط مدل قاب بدون مهاربند و مدل قاب با مهاربند در دو دهانه انتهایی قاب بوده است. میانگین ظرفیت باربری مدل قاب بدون میراگر در برابر زلزله‌های اعمالی برابر با ۹۳۵۳ کیلونیوتن بوده است. این پارامتر در مدل اول نصب میراگر با ۲۱ درصد افزایش به ۱۱۳۵۳ کیلونیوتن صعود نمود. همچنین در دومین مدل نصب میراگر نیز ۳۸ درصد رشد در پاسخ قاب مشاهده شد و میانگین ظرفیت باربری به ۱۲۹۳۶ کیلونیوتن رسید.

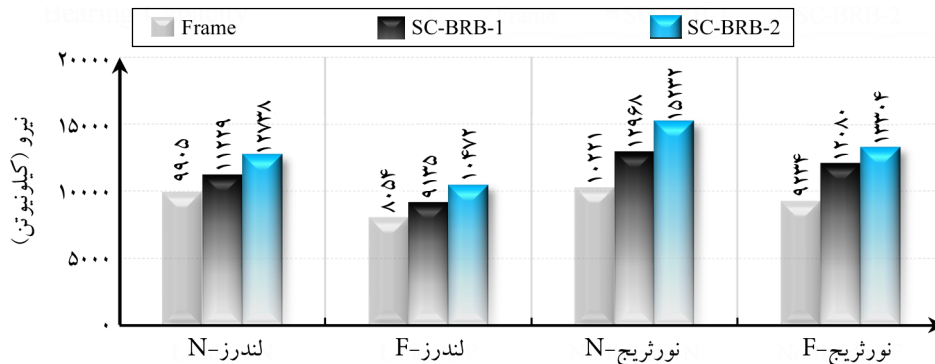
نتایج حاصل از تحلیل قاب‌ها در برابر زلزله گسل دور نورث‌ریج در شکل (۲۵) ارائه شده است. با توجه به نمودارهای این شکل دیده می‌شود که ظرفیت باربری مدل قاب بدون مهاربند، قاب با مهاربند مدل اول و مدل دوم به‌ترتیب برابر با ۹۲۳۳، ۱۲۰۸۰ و ۱۳۳۰۳ کیلونیوتن بوده است. جذب انرژی در این مدل‌ها نیز به‌ترتیب دارای مقادیر ۶۱۲، ۷۲۶ و ۱۲۷۰ کیلوژول می‌باشد. تنش ایجاد شده در این زلزله نیز در اثر استفاده از مدل اول مهاربند کمانش‌ناپذیر خودبازگشتی، به کمترین مقدار خود رسیده است. بیشینه مقادیر ذکر شده در فوق در شکل‌های (۲۶) تا (۲۸) بیان شده‌اند. در هر نمودار، پاسخ سازه در برابر زلزله‌های گسل دور و نزدیک ارائه شده است. افزایش چشمگیر ظرفیت باربری قاب در اثر استفاده از مدل

در مورد جذب انرژی نیز دیده می‌شود پس از اعمال سیستم SC-BRB-2 جهش بسیار بزرگی در جذب انرژی قاب ایجاد شده است. این جهش تحت هر چهار زمین‌لرزه دیده شده است. در این مورد نیز میانگین جذب انرژی در مدل قاب بدون میراگر در برابر

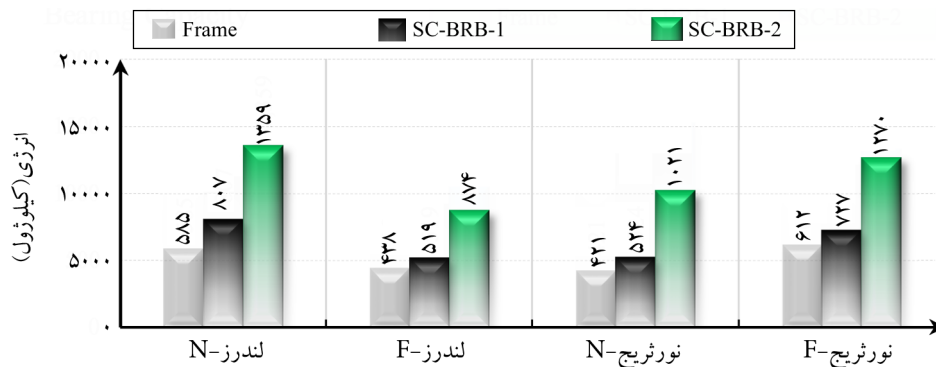
زلزله‌های وارده به مقدار ۶۱۲ کیلوژول بوده است. اعمال میراگر در مدل‌های اول و دوم به ترتیب سبب ۱۸ و ۱۰۷ درصد رشد در جذب انرژی شده و مقدار آن را به ترتیب به ۷۲۶ و ۱۲۷۰ کیلوژول صعود نموده است.



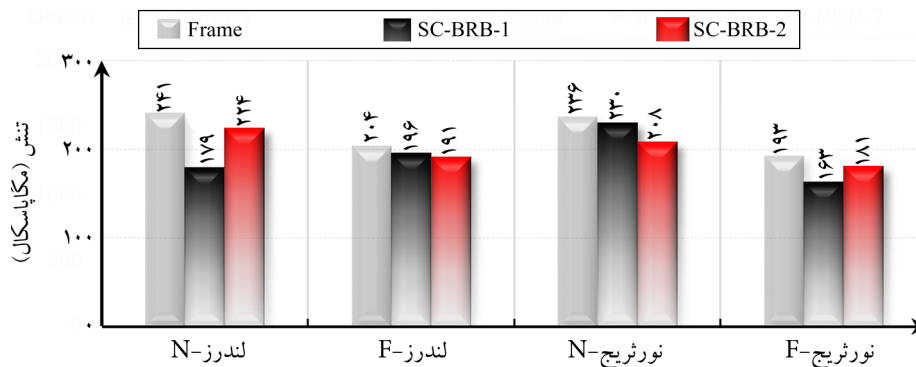
شکل (۲۵): نتایج حاصل از تحلیل قاب‌ها در برابر زلزله گسل دور نورتریج.



شکل (۲۶): بیشینه مقادیر ظرفیت باربری مدل قاب‌ها در برابر زلزله‌های اعمالی.



شکل (۲۷): بیشینه مقادیر ظرفیت باربری مدل قاب‌ها در برابر زلزله‌های اعمالی.



شکل (۲۸): بیشینه مقادیر تنش مدل قاب‌ها در برابر زلزله‌های اعمالی.

کمانش ناپذیر خودبازگشتی تحت بار هیستریزیس قرار داده شد و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. سپس به طراحی و تحلیل لرزه‌ای در مورد سازه ۵ طبقه با و بدون مهاربند در برابر زلزله‌های گسل دور و نزدیک لندرز و نورث‌ریج پرداخته شد. نتایج کلی به دست آمده از این پژوهش به این شرح است که با استفاده از مدل‌های رفتاری مناسب مصالح، پاسخ‌های بسیار دقیق در تحلیل و آنالیز مهاربند کمانش ناپذیر خودبازگشتی توسط الیاف پلیمری بازالت توسط مدل‌سازی اجزای محدود با بهره‌گیری از ABAQUS به دست آمده است. تقریب بسیار مناسب نتایج به دست آمده از مدل عددی با مدل پژوهش ژو و همکاران [۲۱] توانسته است صحت نتایج مدل عددی حاضر را به اثبات برساند. مطابق نتایج بخش صحت‌سنجی، پاسخ هیستریزیس سیستم در مدل ایجاد شده توسط ABAQUS، در بدترین حالت تنها با ۰/۹۶ درصد اختلاف با مدل مورد نظر به دست آمده است. دیده شده است که در بسیاری از حالات، تغییر مکان‌های وارد شده به سازه، تحت زلزله‌های گسل نزدیک، بسیار بزرگ‌تر از زلزله‌های گسل دور

تنش بیشینه وارده به سیستم با عدم قطعیت زیادی همراه بوده است؛ اما به‌طور کلی می‌توان گفت که استفاده از سیستم مهاربندی، سبب می‌شود تا تنش‌های وارده به سیستم قاب فولادی تا حد زیادی کاهش یابند. میانگین بیشینه مقادیر تنش‌های وارده به قاب برابر با ۱۹۲ مگاپاسکال می‌باشد. مدل اول نصب میراگر سبب شد تا ۱۵ درصد افت در بیشینه تنش وارده به قاب دهد و مقدار آن به ۱۶۳ مگاپاسکال نزول یابد. همچنین مدل دوم نصب، با ۶ درصد کاهش، مقدار تنش را به ۱۸۰ مگاپاسکال رسانیده است.

۸- نتیجه‌گیری

در ابتدای پژوهش حاضر، صحت‌سنجی پاسخ اجزای محدود در رابطه با سیستم مهاربند کمانش ناپذیر خودبازگشتی (SC-BRB) به همراه تاندون‌های پلیمری با الیاف بازالت بر مبنای مطالعه ژو و همکاران [۲۱] صورت پذیرفت. سپس یک قاب یک طبقه یک دهانه در چهار حالت مختلف قاب خمشی ساده، قاب با مهاربند ساده، قاب با مهاربند کمانش ناپذیر و قاب به همراه مهاربند

7. Rojas, P., Ricles, J.M., and Sause, R. (2005) Seismic performance of post-tensioned steel moment resisting frames with friction devices. *Journal of Structural Engineering*, 131(4), 529-40.
8. Priestley, M.J., Sritharan, N.S., Conley, J.R., and Pampanin, S. (1999) Preliminary results and conclusions from the PRESSS five-story precast concrete test building. *PCI Journal*, 44(6), 42-67.
9. Dusicka, P. and Tinker, J. (2013) Global restraint in ultra-lightweight buckling-restrained braces. *Journal of Composites for Construction*, 17(1), 139-50.
10. Tremblay, R., Bolduc, P., Neville, R., and DeVall, R. (2006) Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(2), 183-98.
11. Fahnstock, L.A., Ricles, J.M., and Sause, R. (2007) Experimental evaluation of a large-scale buckling-restrained braced frame. *Journal of Structural Engineering*, 133(9), 1205-14.
12. Fahnstock, L.A., Sause, R., and Ricles, J.M. (2007) Seismic response and performance of buckling-restrained braced frames. *Journal of Structural Engineering*, 133(9), 1195-1204.
13. Watanabe, A. et al. (1988) Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube. *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, 719-24.
14. Erochko, J., Christopoulos, C., Tremblay, R., and Choi, H. (2011) Residual drift response of smrfs and brb frames in steel buildings designed according to ASCE 7-05. *Journal of Structural Engineering*, 137(5), 589-99.
15. Kiggins, S. and C.-M. Uang (2006) Reducing residual drift of buckling-restrained braced frames as a dual system. *Engineering Structures*, 28(11), 1525-32.
16. Sabelli, R., Mahin, S., and Chang, C. (2003) Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces. *Engineering Structures*, 25(5), 655-66.
17. Zhou, Z. et al. (2014) Development of a novel self-centering buckling-restrained brace with BFRP composite tendons. *Steel and Composite* بوده‌اند. همچنین ظرفیت باربری و جذب انرژی سازه در حالت دوم مهاربندی، بیشترین مقادیر را داشته است. به این صورت که در حالت اول و پس از استفاده از مدل SC-BRB-1، ظرفیت باربری و جذب انرژی مدل نسبت به قاب بدون مهاربند به ترتیب به میزان ۲۱ و ۱۸ درصد افزایش داشته است. این پارامترها پس از اعمال مهاربند در حالت دوم و در مدل SC-BRB-2 به ترتیب دارای ۳۸ و ۱۰۷ درصد رشد و بهبود بوده‌اند.

قدردانی

نویسندگان مقاله از هم‌فکری اساتید محترم پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و از همکاری مسئولان و کارمندان پژوهشگاه بابت در اختیار گذاشتن سایت و امکانات مناسب کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

1. Hacker, Th., Eigenmann, R., and Rathje, E. (2013) Advancing earthquake engineering research through cyberinfrastructure. *Journal of Structural Engineering*, 139(7), 1099-1111.
2. Dyke, Sh. (2010) *2020 Vision for Earthquake Engineering Research: Report on an Openspace Technology Workshop on the Future of Earthquake Engineering*.
3. Dyke, S.J. et al. (2012) Community Workshop: 2020 Vision for Earthquake Engineering Research in the USA. *Proceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE)*, 1582.
4. Hambleton, J.P., Makhnenko, R., and Budge, A.S. (2020) *Geo-Congress 2020: Geotechnical Earthquake Engineering and Special Topics*. In American Society of Civil Engineers Reston, VA.
5. Garlock, M.M., Ricles, J.M., and Sause, R. (2005) Experimental studies of full-scale posttensioned steel connections. *Journal of Structural Engineering*, 131(3), 438-48.
6. Christopoulos, C., Filiatrault, A., Uang, C.-M., and Folz, B. (2002) Posttensioned energy dissipating connections for moment-resisting steel frames. *Journal of Structural Engineering* 128(9), 1111-20.

Structures, 16(5), 491-506.

18. Dong, H. et al. (2017) Performance of an innovative self-centering buckling restrained brace for mitigating seismic responses of bridge structures with double-column piers. *Engineering Structures*, 148, 47-62.
19. Xie, Q., Zhou, Z., and Meng, S.-P. (2020) Behaviour of BFRP tendon systems under cyclic loading and its influence on the dual-tube SC-BRB hysteretic performance. *Construction and Building Materials*, 259, 120388.
20. Ghowsi, A.F. and Sahoo, D.R. (2020) Near-field earthquake performance of SC-BRBs with optimal design parameters of SMA. *Journal of Constructional Steel Research*, 175, 106321.
21. Zhou, Z. et al. (2015) Experimental investigation of the hysteretic performance of dual-tube self-centering buckling-restrained braces with composite tendons. *Journal of Composites for Construction*, 19(6), 4015011.
22. Miller, D.J., Fahnestock, L.A., and Eatherton, M.R. (2012) Development and experimental validation of a nickel-titanium shape memory alloy self-centering buckling-restrained brace. *Engineering Structures*, 40, 288-98.

واژه‌نامه

Self-Centering Buckling-Restrained Brace (SC-BRB)	۱- مهاربند کمانش‌ناپذیر با قابلیت برگشت به موقعیت اولیه
Buckling-Restrained Brace (BRB)	۲- مهاربندهای کمانش‌ناپذیر
Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP)	۳- الیاف پلیمری مقاوم‌شده با بازالت
Record Sequence Number (RSN)	۴- ثبت رویداد زلزله
Static General	۵- تحلیل استاتیکی
Dynamic Implicit	۶- تحلیل دینامیکی ضمنی

Hysteresis and Seismic Analysis of Self-Reversible Buckling Braces with Polymer Tendons in Steel Frames

Saeid Gheshlaghi¹ and Fariborz Nateghi-Alahi^{2*}

1. M.Sc. Graduate, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran
2. Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: nateghi@iiees.ac.ir

One of the main aims of structural seismic design is to control structural damage due to severe earthquakes. A feasible solution to control and deplete earthquake energy is to use a bracing system. When the bracing is in the process of cyclic deformation or seismic load, the plastic deformation of the compressive and tensile cycles will occur in the restrained parts of the core plates, which will create a suitable energy absorption capacity in the brace. Among them, Buckling-Restrained Brace (BRBs) are widely used due to their stable hysteresis behavior. BRB braces usually have two main parts: a core that withstands the axial force, and a lateral restraint shell to prevent the core from buckling under compressive force. In the event of a severe earthquake, the core surrenders, but still reduces structural damage by absorbing seismic energy. However, due to the fact that the stiffness after the surrender of the brace is relatively low and it is not able to return to the conditions before the surrender, the structural frame faces damage and deformation of the residue after severe earthquakes. In this regard, the buckling brace with the ability to return to the original position known as Self-Centering Buckling-Restrained Brace (SC-BRB) has recently been considered by researchers. In this type of braces, the return phase is provided by polymer tendons. Since the numerical study of SC-BRB behavior measurement has not been done so far, so the present study tries to evaluate the behavior of this type of brace and compare it with steel bending frame and braced frame. For this purpose, Abaqus software has been used.

In the present study, the results of the laboratory study of Zhou et al. (2015) in the analysis of the self-returning buckling system reinforced by SC-BRB basalt fibers have been used to validate the finite element model and the specifications of the brace to the steel frames of the case. The discussion in this study is generalized. The development of numerical model has been based on laboratory study. Then, a single-story, single-span frame in four different modes, simple bending frame, frame with simple bracing, frame with non-buckling brace, and frame with self-returning buckling brace was subjected to hysteresis and the results were compared. Then, design in ETABS software and seismic analysis in Finite element Abaqus software for 5-story structures with and without bracing against far and near Landers and Northridge earthquake faults.

Comparisons were also made between the performance of a simple bending frame, a braced frame, a buckle with a buckling brace, and a braced frame with the SC-BRB system. Finally, the seismic performance of the frame was performed with SC-BRB bracing. The general results obtained from this study are as follows: Using appropriate behavioral models of materials, very accurate answers in the analysis of non-buckling irreversible buckling by basalt polymer fibers by finite element modeling using Abaqus. A very good approximation of the results obtained from the numerical model with the research model of Zhou et al. has been able to prove the accuracy of the results of the present numerical model. The results generally indicate the very good behavior of SC-BRB braces, the use of which in the structure has significantly increased the load-bearing capacity and ductility of the structure. The application of SC-BRB bracing in the bending frame increased the lateral bearing capacity of a single-story single-span frame from 1248 kN with a 2.8-fold increase to 3576 kN. Also, the strength of the five-story structure using SC-BRB braces installed in the two modes of middle openings and side openings was 21% and 38% higher than the simple bending frame, respectively.

Keywords: BRB, SC-BRB, Hysteresis Analysis, Seismic Analysis, FEM.